

Zum Tragverhalten mikrobewehrter Ultrahochleistungsbetone

Der Fakultät für Ingenieurwissenschaften,
Abteilung Bauwissenschaften
der Universität Duisburg-Essen
zur Erlangung des akademischen Grades einer
Doktor-Ingenieurin (Dr.-Ing.)
vorgelegte und genehmigte

DISSERTATION

von
Dipl.-Ing. Melanie Prager
aus Essen

Essen 2017

Dipl.-Ing. Melanie Prager

Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten.

Hauptreferent:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martina Schnellenbach-Held
Korreferent:	Prof. Thomas Vogel

Tag der Einreichung:	14. Juli 2017
Tag der mündlichen Prüfung:	24. November 2017

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand überwiegend während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Massivbau der Universität Duisburg-Essen.

Frau Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martina Schnellenbach-Held danke ich herzlich für die Betreuung und Förderung dieser Arbeit sowie die in jeder Hinsicht gewährte Unterstützung sowohl während meiner gesamten Tätigkeit am Institut als auch nach meinem Wechsel in die Industrie.

Herrn Prof. Thomas Vogel danke ich sehr für die Übernahme des Korreferats sowie sein Interesse an meiner Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt den Kolleginnen und Kollegen am Institut für Massivbau. Für die fachlichen Diskussionen und freundschaftliche Zusammenarbeit danke ich insbesondere Dipl.-Ing. Jan-Eric Habersaat, Dr.-Ing. Björn Karczewski, Dr.-Ing. Michael Peeters und Dr.-Ing. Angelika Eßer.

Herrn Alfred Gäbel danke ich herzlich für sein Engagement in der Versuchshalle und seine stets positive Stimmung.

Meinem Arbeitgeber, Basler & Hofmann AG Zürich, danke ich für die gewährten Freiräume zur Fertigstellung meiner Arbeit. Stellvertretend sei an dieser Stelle meinen Vorgesetzten Dr.-Ing. Hans Tschamper und Dipl.-Ing. Felix Gisler gedankt.

Ganz besonders bedanke ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden, die mir auf meinem bisherigen Lebensweg fortwährend zur Seite gestanden und mich während des gesamten Promotionsprozesses immer unterstützt und im richtigen Moment abgelenkt haben.

Küsnacht, im Dezember 2017

Melanie Prager

*Wir erholen uns nicht
im Laufe der Zeit,
sondern in der Zeit,
in der wir laufen.*

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1	Einleitung	1
1.1	Motivation.....	1
1.2	Stand der Forschung	4
1.2.1	Entwicklung von Eisenbeton	4
1.2.2	Ferrocement	5
1.2.3	SIFCON, SIMCON, SIMCON-NEU, DUCON	8
1.3	Zielsetzung und Inhalt der Arbeit	10
Kapitel 2	Ultrahochleistungsbeton (UHPC)	13
2.1	Allgemeines	13
2.2	Regelwerke	14
2.3	Verwendete UHPC-Mischungen	15
2.3.1	Ausgangsmaterialien.....	16
2.3.2	Herstellung.....	20
2.3.3	Frischbetoneigenschaften.....	23
2.3.4	Temperaturentwicklung infolge Hydratation.....	24
Kapitel 3	Experimentelle Untersuchungen	27
3.1	Allgemeines	27
3.2	Materialverhalten der Mikrobewehrung	29
3.3	Verbundverhalten Mikrobewehrung/UHPC	32
3.3.1	Allgemeines und Versuchsaufbau	32
3.3.2	Ergebnisse	34
3.4	Druckfestigkeit und statischer E-Modul von UHPC	36
3.4.1	Allgemeines	36
3.4.2	Unbewehrter UHPC	37
3.4.3	Faserbewehrter UHPC	39
3.4.4	Mikrobewehrter UHPC	42
3.4.5	Fazit	45

3.5	Zentrische Zugfestigkeit von UHPC und Nachrissverhalten	48
3.5.1	Allgemeines.....	48
3.5.2	Unbewehrter UHPC	50
3.5.3	Faserbewehrter UHPC.....	52
3.5.4	Mikrobewehrter UHPC	54
3.5.5	Fazit.....	56
3.6	Biegetragverhalten von UHPC.....	56
3.6.1	Allgemeines.....	56
3.6.2	Unbewehrter UHPC	58
3.6.3	Faserbewehrter UHPC.....	59
3.6.4	Mikrobewehrter UHPC	61
3.6.5	Duktilität.....	82
3.6.6	Fazit.....	86
3.7	Dauerhaftigkeit.....	89
3.7.1	Allgemeines.....	89
3.7.2	CDF-Test.....	90
3.8	Fazit.....	99
Kapitel 4	Analytische Beschreibung des Tragverhaltens	101
4.1	Allgemeines.....	101
4.2	Druck.....	101
4.3	Zug und Rissmechanik.....	103
4.3.1	Mikrobewehrung	103
4.3.2	Unbewehrter UHPC	104
4.3.3	Verbund.....	106
4.3.4	Mikrobewehrter UHPC	110
4.3.5	Einflussfaktoren	119
4.4	Reine Biegung.....	126
4.4.1	Allgemeines.....	126
4.4.2	Zustand I.....	128
4.4.3	Zustand II	130
Kapitel 5	Numerische Untersuchungen	139
5.1	Allgemeines.....	139
5.2	Materialmodelle und Rechenkonzept.....	139
5.2.1	UHPC	141

5.2.2	Mikrobewehrung	144
5.3	Modellierung und Berechnungsoptionen.....	145
5.3.1	Vorbemerkungen	145
5.3.2	Elementtypen	145
5.3.3	Verbund	146
5.3.4	Finite Elemente Netz	148
5.3.5	Iterative Berechnung	148
5.4	Evaluation des numerischen Modells	149
5.4.1	Allgemeines	149
5.4.2	Druck	150
5.4.3	Biegung	151
Kapitel 6	Entwicklung eines Bemessungsansatzes	161
6.1	Allgemeines	161
6.2	Voraussetzungen.....	161
6.2.1	Spannungs-Dehnungs-Beziehung des UHPC - Druck.....	162
6.2.2	Spannungs-Dehnungs-Beziehung des mikrobewehrten UHPC - Zug	165
6.2.3	Spannungs-Dehnungs-Beziehung der Mikrobewehrung	165
6.3	Bemessungshilfsmittel für den Grenzzustand der Tragfähigkeit	
	- Bemessung für reine Biegung	166
6.3.1	Bemessungstafel	166
Kapitel 7	Zusammenfassung und Ausblick	175
7.1	Zusammenfassung	175
7.2	Ausblick.....	178
Literaturverzeichnis		181
Anhang A	Experimentelle Untersuchungen	A-1
Anhang B	Analytische und numerische Zusammenhänge	B-1
Anhang C	Bemessungsdiagramme	C-1

Formelzeichen

Große lateinische Buchstaben

A	Fläche, Querschnittsfläche
A_{MB}	effektive (in Zugrichtung angeordnete) Querschnittsfläche der Mikrobewehrung
$A_{s,min}$	Querschnittsfläche der Mindestbewehrung
A_{UHPC}	Nettoquerschnittsfläche der UHPC-Matrix
E	E-Modul
E_{cm}	mittlerer E-Modul
$E_{c\infty}$	Langzeit-E-Modul
E_d	Bemessungswert der Einwirkungen
E_s	Sekanten-E-Modul
F	Kraft
F_C	Druckkraft
F_{MBi}	Kraft in der Mikrobewehrungslage i
F_T	Zugkraft
G_F	Bruchenergie
I	Flächenträgheitsmoment
M	Moment
M_{Ed}	Bemessungsmoment
M_{Rd}	aufnehmbares Moment
MW	Mittelwert; Maschenweite
M_{yd}	Fließmoment
N_L	Anzahl Drähte in Zugrichtung je Mikrobewehrungsmatte
R_d	Bauteilwiderstand
T_{max}	Biege Zähigkeitsindex
V_{MB}	Mikrobewehrungsgehalt
$V_{MB,L,min}$	Mindestanteil [Vol.-%] Mikrobewehrung in Zugrichtung
V_{UHPC}	Nettoanteil UHPC [Vol.-%] ($= 1 - \eta_{MB} \times V_{MB}$)

Kleine lateinische Buchstaben

b	Breite
d	statische Höhe
d_{MBi}	statische Höhe der Mikrobewehrungslage
f_{cd}	Bemessungswert der Druckfestigkeit
$f_{cflm, Li}$	Nachrissbiegezugfestigkeit bei Durchbiegung i
f_{ck}	charakteristischer Wert der Druckfestigkeit
f_{cm}	Mittelwert der Druckfestigkeit (aus Versuchswerten)
f_{ct}	zentrische Zugfestigkeit
$f_{ct, fl}$	Biegezugfestigkeit
f_{td}	Bemessungswert der Zugfestigkeit
f_{tk}	charakteristischer Wert der Zugfestigkeit
f_{yd}	Bemessungswert der Streckgrenze
f_{yk}	charakteristischer Wert der Streckgrenze
h	Höhe
l	Länge
l_b	Verbundlänge
l_e	Lasteinleitungslänge
l_{ges}	Gesamtlänge
$l_{M, const}$	Bauteillänge mit konstanter Biegebeanspruchung
l_{MW}	Maschenweite
n	Anzahl Mikrobewehrungsmatten
s_r	Rissabstand
t	Höhe des Querschnittsanteils, der auf Zug mitwirkt
w	Rissbreite
w_{max}	maximale Rissbreite
w_u	Rissbreite bei Versagen
$w_{UHPC, max}$	maximale Rissbreite UHPC, bis zu welcher eine Kraftübertragung möglich ist
x	Druckzonenhöhe
z	Hebelarm der inneren Kräfte
z_{MBi}	Abstand der Schwerachse zur Mikrobewehrungslage i

Griechische Buchstaben

α	Verhältnis der E-Moduli E_{MB}/E_{UHPC}
γ	Teilsicherheitsbeiwert (Materialseite)
δ_{Fcr}	Durchbiegung bei Erstrisskraft
δ_{Fmax}	Durchbiegung bei Maximallast

ε	Dehnung
$\varepsilon_{\text{Rand}}$	Dehnung am Bauteilrand
$\varepsilon_{\text{UHPC,min}}$	Stauchung UHPC-Matrix bei $\sigma_{\text{UHPC,min}}$
η_{MB}	Wirksamkeit der Mikrobewehrung in Beanspruchungsrichtung (bei quadratischer Maschenstruktur = 0,5)
κ	Krümmung
σ	Spannung
σ_{comp}	Spannung Verbundwerkstoff (mikrobewehrter UHPC)
$\sigma_{\text{comp,max}}$	maximale Spannung (Zugspannung) Verbundwerkstoff
$\sigma_{\text{comp,min}}$	Mindestzugspannung Verbundwerkstoff (= $\sigma_{\text{comp}}(w_{\text{UHPC,max}})$)
σ_{max}	maximale Spannung (Zugspannung)
σ_{min}	minimale Spannung (Druckspannung)
σ_{MBi}	Spannung in der Mikrobewehrungslage i
τ_b	Verbundspannung

Indizes

c	Druck-
cal	analytisch ermittelt
comp	bezogen auf Verbundwerkstoff (composite)
cr	Riss-
d	Bemessungswert
exp	experimentell ermittelt
F	faserbewehrt / bezogen auf Fasern
ideell	bezogen auf ideellen Querschnitt
I	Zustand I (ungerissen)
II	Zustand II (gerissen)
k	charakteristischer Wert
m	mittlerer Wert
MB	mikrobewehrt / bezogen auf Mikrobewehrung
min	minimaler Wert
mind	Mindestwert
max	maximaler Wert
u	Bruch-
UHPC	bezogen auf UHPC-Matrix
y	Fließ-

Symbol

\varnothing	Durchmesser
---------------	-------------

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

Ultrahochleistungsbeton stellt derzeit den leistungsfähigsten Betonbaustoff dar. Durch intensive Forschungsarbeit ist es gelungen, einen Beton herzustellen, der neben seiner hohen Druckfestigkeit von mindestens 150 N/mm^2 eine hervorragende Dichtigkeit besitzt. Aufgrund der durch die Dichtigkeit maßgeblich verbesserten Dauerhaftigkeitseigenschaften spricht man häufig nicht allein von einem "ultrahochfesten Beton" (engl.: **Ultra High Strength Concrete**, UHSC), sondern von einem "Ultrahochleistungsbeton" (engl.: **Ultra High Performance Concrete**, UHPC).

Die hohe Gefügedichte, die die Grundlage für die guten Festigkeits- und Dauerhaftigkeitseigenschaften bildet, ist jedoch auch dafür verantwortlich, dass Ultrahochleistungsbeton ein weitaus spröderes Materialverhalten aufweist, als Normalbeton. Diese Sprödigkeit führt dazu, dass die hohe Druckfestigkeit nicht ausgenutzt werden kann. Ganz ohne Vorankündigung tritt bei Erreichen der maximalen Festigkeit ein schlagartiges bzw. explosionsartiges Versagen ein. Um die Duktilität der Betonmatrix zu erhöhen, werden dem Ultrahochleistungsbeton Stahlfasern, üblicherweise hochfeste Mikrodrahtfasern, zugegeben. Diese führen zum einen dazu, dass das Versagen durch Rissbildung angekündigt wird; zum anderen gewährleisten sie durch ihre rissüberbrückende Wirkung ein stabiles Nachbruchverhalten.

Die Zugabe von Stahlfasern birgt jedoch auch eine ganze Reihe von Nachteilen:

- Der ohnehin verhältnismäßig lange Mischprozess des Ultrahochleistungsbetons wird verlängert, da die Fasern erst nach Vermischung aller anderen

Ausgangsstoffe und entsprechender Konsistenz hinzu gegeben werden können. Zudem erfolgt die Zugabe vereinzelter Fasern, um eine Verklumpung durch Igelbildung zu vermeiden. Ein länger andauernder Mischprozess führt unweigerlich zu einer Erhöhung der Frischbetontemperatur, die wiederum die Konsistenz und Verarbeitbarkeit des Frischbetons direkt beeinflusst. Durch eine erschwerte Verarbeitbarkeit weisen Betone mit Fasern in der Regel deutlich erhöhte Luftporengehalte auf [HoDK11], die sich wiederum festigkeitsmindernd auswirken. Zusätzlich ist bei einem verlängerten Mischprozess die nachlassende Wirksamkeit des Fließmittels zu berücksichtigen.

- Die Orientierung der Fasern innerhalb der Betonmatrix ist zunächst zufällig, beeinflusst jedoch maßgeblich die Leistungsfähigkeit eines Ultrahochleistungsbetons. Fasern, die nicht in Krafrichtung orientiert sind, beteiligen sich nicht effektiv am Lastabtrag. Schalungsflächen und -kanten sowie Verdichtungsaufwand können ebenso zu einer Beeinflussung der Faserorientierung führen wie die Betonierrichtung und Frischbetonkonsistenz [SoLe90, EdHa72, EmTe09, Ko00]. Für eine Bemessung von stahlfaserbewehrtem UHPC ist aufgrund der Unsicherheiten hinsichtlich der Faserorientierung stets ein Orientierungsbeiwert wie bei herkömmlichem Stahlfaserbeton zu berücksichtigen [MC10, RStf10].
- Durch die Faserzugabe während des Mischprozesses ist eine homogene Verteilung der Fasern insbesondere bei steigendem Fasergehalt schwer realisierbar. Unregelmäßigkeiten und Fehlstellen bezüglich der Faserverteilung können die Leistungsfähigkeit eines stahlfaserbewehrten UHPC allerdings in starkem Maß herabsetzen bzw. beeinträchtigen.
- Oberflächennahe Fasern sind der freien Bewitterung ausgesetzt, eine Betondeckung wie beim herkömmlichen Stahlbetonbau ist hier nicht sicherzustellen. Die Voraussetzungen zur Korrosion von Stahlfasern sind durch die Anwesenheit von Sauerstoff und Wasser gegeben. Zwar wird die Tragfähigkeit durch die Korrosion der randnahen Fasern nicht beeinträchtigt, jedoch das Erscheinungsbild und gegebenenfalls die Dauerhaftigkeit eines Bauteils, sodass meist Anstriche und Beschichtungen erforderlich werden. Bezüglich der Dauerhaftigkeitseigenschaften ist zudem die erhöhte Permeabilität von faserbewehrtem UHPC gegenüber faserlosem UHPC [MüS11] zu berücksichtigen.
- Ein wesentlicher Aspekt liegt auf den ökonomischen und ökologischen Kosten. Die üblicherweise verwendeten Mikrodrahtfasern stellen bei der Herstellung von faserbewehrtem UHPC ca. 70 % der Gesamtkosten dar [Ste11]. Diese hohen Kos-

ten resultieren aus dem energieintensiven Aufwand, den die Mikrodrahtfaserherstellung erfordert. Die größten Anteile hinsichtlich des Energieverbrauchs ergeben sich hierbei zum einen aus dem Nassziehen sowie zum anderen aus der Gewinnung von Elektro Stahl [StSc08, StSc14]. Erst durch den Prozess des Nassziehens werden Faserdurchmesser von ca. 0,2 mm erzielt. Neben dem hohen Energieaufwand und damit verbundenen Treibhauspotential sowie durch den Einsatz von großen Mengen an (Kühl-)Schmierstoffen resultieren aus diesem Prozess (weitere) erhebliche Umweltbelastungen.

Aus den genannten Aspekten wird deutlich, dass eine Verwendung von Fasern auf der einen Seite notwendig ist, um ausreichende Duktilität zu gewährleisten, auf der anderen Seite deren Einsatz aufgrund der aufgeführten Nachteile jedoch idealerweise zu minimieren bzw. bestenfalls sogar zu substituieren ist.

Bei einem vollständigen Ersatz der Fasern in UHPC setzt die vorliegende Arbeit an. Die Fasern sollen dabei durch dünne Drähte, die durch Punktschweißen eine Gittermattenstruktur aufweisen, eine so genannte Mikrobewehrung (Abbildung 1.1), ersetzt werden.

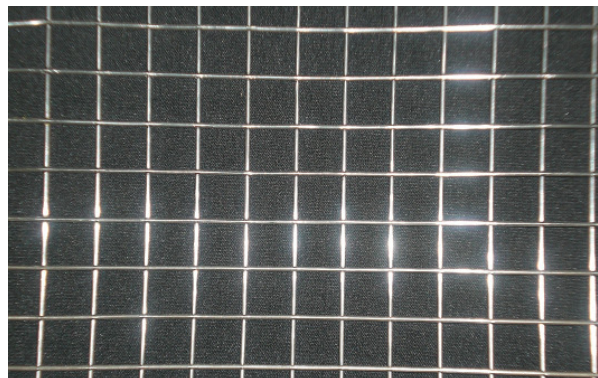


Abbildung 1.1: Mikrobewehrung

1.2 Stand der Forschung

1.2.1 Entwicklung von Eisenbeton

Bereits im Jahr 1855 meldete der Franzose Joseph Louis Lambot (1814-1887) ein Patent für einen „Holzaustauschwerkstoff“ im Bereich des Schiffbaus an [WWW1]. Sein „Ferciment“, bestehend aus einem Beton mit einem Drahtnetz, sollte für „feuchtigkeitsgefährdete Gegenstände“ im Schiffsbau Anwendung finden. Eines seiner Boote aus Ferciment fand sich als Exponat auf der Weltausstellung 1855 in Paris. Um die Jahrhundertwende folgte der Bau weiterer zahlreicher drahtbewehrter Betonboote [Bay91].

Im Jahr 1861 erweiterte der Ingenieur Francois Coignet das von Lambot eingereichte Patent. Er hatte die Idee, gekrümmte Tragelemente bzw. Bauteile für den konstruktiven Ingenieurbau aus dem mit Eisengeflecht bewehrten Beton herzustellen.

Parallel zu den Forschungsaktivitäten in Frankreich führte der Amerikaner Thaddeus Hyatt (1816-1901) erste Versuche an bewehrten Balken durch, wobei er bereits eine Bewehrung in der Zugzone anordnete und zusätzlich senkrechte bügelartige Eisen verwendete.

Während sich die Erkenntnisse von Hyatt nicht bis nach Europa durchsetzten, meldete der Gärtner Joseph Monier (1823-1906) 1867 sein erstes Patent zur Herstellung drahtbewehrter Blumenkübel aus Zement an. Mit Veröffentlichung weiterer Monier-Patente (u. a. zu Röhren, Behältern, Treppen) erlangte der Baustoff „Eisenbeton“ erst seine Bekanntheit.

Der Zeit- und Arbeitsaufwand, mit welchem die Herstellung der Drahtgittermatten verbunden war, führte jedoch dazu, dass im konstruktiven Ingenieurbau bevorzugt Eisenstäbe dickeren Durchmessers als Bewehrung, wie sie im heutigen Stahlbetonbau zum Einsatz kommen, verwendet wurden. Im Schiffsbau hingegen wurde auch gerade während des ersten Weltkriegs aufgrund der Knappheit an Stahlplatten weiterhin auf den Einsatz der Drahtgittermatten gesetzt [AdvC73].

Erst Mitte der 40er Jahre, also knapp 100 Jahre später, kamen die engmaschigen dünnen Drahtnetze in zementöser Matrix auch wieder im Bauwesen zum Einsatz. Der Italiener Pier Luigi Nervi (1891-1979) stellte hieraus Fertigteile für weit gespannte Flächentragwerke her. Entsprechend der Zusammensetzung – Stahl und Zement – gab er dem „neuen Baustoff“ den Namen „Ferro-Cemento“ (heute: Ferrocement).

1.2.2 Ferrocement

Definition

Eine offizielle Definition für Ferrocement findet sich im ACI State-of-the-Art Report on Ferrocement [ACI97]: „Ferrocement is a type of thin reinforced concrete commonly constructed of hydraulic cement mortar reinforced with closely spaced layers of continuous and relatively small size wire mesh. The mesh may be made of metallic or other suitable materials.”

Demnach ist Ferrocement ein dünnwandiger, bewehrter Beton, meist aus hydraulischem Zementmörtel, bewehrt mit dicht aneinander liegenden, durchgehenden, relativ engmaschigen Drahtgittern. Dabei können die Gitter aus metallischen oder anderen geeigneten Materialien bestehen.

Materialverhalten

Gemäß seinen Bestandteilen ist Ferrocement somit eine Form des Stahlbetons, wobei sich die Art sowie die Verteilung der Bewehrung der beiden Techniken deutlich voneinander unterscheiden. Für die Herstellung eines Ferrocements kommen mehrere Lagen eines engmaschigen Drahtnetzes zum Einsatz. Die Drahtgitter sind dabei gleichmäßig über den gesamten Querschnitt verteilt. Die dünnen Drähte weisen einen Durchmesser von ca. 0,5 bis 1,5 mm auf. Die Maschenweite der Netze beträgt zwischen 6 und 25 mm [Swa84, Na00].

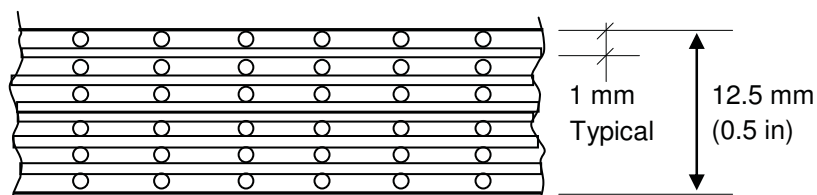


Abbildung 1.2: Typischer Querschnitt eines Ferrocementbauteils [Na00]

Aufgrund der engen Abstände der Bewehrungsmatten untereinander unterscheidet sich das Trag- und Verformungsverhalten von Ferrocement von dem des Stahlbetons. Rissbreiten und Rissabstände werden durch die große Verbundfläche von Stahl und Beton und die geringen Abstände der netzartigen Bewehrungsmatten verkleinert. Zudem weist

der Verbundwerkstoff je nach Stahlgehalt ein nahezu elastisches, außergewöhnlich duktiles, Materialverhalten auf.

Um die Eigenschaften von Ferrocement eingehend zu untersuchen, wurden ab 1974/75 nationale und internationale Institutionen gegründet (American Concrete Institute's Committee on Ferrocement (ACI Committee 549), International Ferrocement Information Center (IFIC Bangkok), International Ferrocement Society (IFS)). Im Jahr 1979 führte RILEM (International Union of Testing and Research Laboratories of Materials and Structures) eine Kommission zur Bewertung von Prüfverfahren für Ferrocement ein. 1982 erschien der erste „State-of-the-Art Report on Ferrocement“ [ACI82], 1988 die Richtlinie „Guide for the Design, Construction, and Repair of Ferrocement“ [ACI88] und seit 2001 ist der „Ferrocement Model Code“ [IFS01] erhältlich.

Anwendung

Infolge der Flexibilität bzw. leichten Formbarkeit der Drahtgittermatten eignet sich Ferrocement insbesondere für die Herstellung von Freiformflächen, da zur Herstellung, anders als bei herkömmlichem Beton, keine Schalung erforderlich ist. Da der Feinkornbeton direkt auf das Bewehrungsnetz aufgespachtelt oder gespritzt werden kann, entfallen für die gekrümmten Strukturen komplizierte Schalungsarbeiten. Die Möglichkeit, extrem dünne bzw. filigrane und damit leichte Bauelemente herzustellen, gelingt durch die relativ hohe Zugfestigkeit des Verbundwerkstoffes.

Dennoch ist Ferrocement ein Material, das nahezu ausschließlich in Entwicklungsländern Anwendung findet. Der maßgebende Grund hierfür liegt im Herstellungsprozess. Zwar können Schalungsarbeiten entfallen, doch der Prozess der Bewehrungsarbeiten ist derart arbeitsaufwändig, dass sich diese Bauweise in Industrieländern nicht durchsetzen konnte und für den herkömmlichen Stahlbetonbau keine Konkurrenz darstellt. Für Entwicklungsländer hingegen, in denen Lohnkosten einen sehr geringen Anteil an den Gesamtkosten ausmachen, ist Ferrocement auch gerade vor dem Hintergrund der einfachen Handhabung beliebt. Schweres Gerät ist aufgrund der relativ dünnen Struktur nicht nötig. Zudem erfordert die Herstellung kein hoch qualifiziertes Personal und die Ausgangsmaterialien liegen in nahezu allen Ländern vor. Neben dem Einsatz als Baustoff für Boote, wird Ferrocement aufgrund der Dichtigkeit auch für die Herstellung von Silos und Tanks sowie zur Errichtung traditioneller Behausungen verwendet.

Weiterentwicklungen

Fortschritte auf dem Gebiet der Materialtechnologie führten dazu, dass beide Komponenten des Verbundwerkstoffs Ferrocement hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit im Laufe der Jahre optimiert wurden. Im Gegensatz zum früher verwendeten Zementmörtel können heute durch den Einsatz leistungsfähiger Fließmittel und hochreaktiver Feinststoffe, Feinkornbetone mit verbesserten Dauerhaftigkeitseigenschaften sowie extrem hohen Festigkeiten als Bindemittel verwendet werden. Anstelle des traditionellen Drahtgitternetzes ist es heute möglich, Netze aus Textil oder hochfesten Kompositmaterialien (Carbon-, Aramid- oder Glasfasern, eingebettet in eine Polymermatrix) mit verbesserten Dauerhaftigkeitseigenschaften als Bewehrung in Ferrocement zu integrieren. In der Regel sind derartige Verbundwerkstoffe aus Textil und Feinkornbeton jedoch eher unter dem Begriff „Textilbeton“ als unter „Ferrocement“ zu finden [Bra06]. Aufgrund der Fortschritte im Bereich der Materialtechnologie schlug Naaman [Na06] vor, die Bezeichnung „Ferrocement“ der Formulierung „laminated cementitious composites“ (geschichtete zementgebundene/zementöse Verbundwerkstoffe) unterzuordnen und damit der Entwicklung und Verwendung innovativer Materialien gerecht zu werden. Auch die Kommission „American Concrete Institute’s Committee on Ferrocement - ACI 549“ hat inzwischen ihren Titel geändert und nennt sich heute: “American Concrete Institute’s Committee on Thin Reinforced Cementitious Products and Ferrocement - ACI 549“.

Neben Fortschritten auf materialtechnologischer Seite waren auch neue Bewehrungsarten und -anordnungen Grundlage weiterer Untersuchungen. Beispiele hierfür sind neben Kombinationen aus Ferrocement und Faser(matten)beton als „Hybrid Ferrocement Composites“ [Na98] oder „SIMCON-NEU“ [Hau99] (vgl. Kapitel 1.2.3) auch der Einsatz dreidimensionaler Drahtgitter [Bow75].

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass der Begriff Ferrocement sehr weit gefasst ist und letztendlich alle Verbundmaterialien einschließt, bei denen mehrere Lagen engmaschiger Metallgitter (oder Gitter hergestellt aus anderen Materialien) von einer zementgebundenen Matrix umschlossen sind. Diese Gitter weisen dabei untereinander nur sehr geringe Abstände auf, sodass pro Zentimeter Bauteildicke eine Verwendung von fünf Gitterlagen keine Seltenheit darstellt [MCFC01], was bedingt durch den hohen Stahlgehalt in einer erheblichen Tragfähigkeitssteigerung resultiert.

1.2.3 SIFCON, SIMCON, SIMCON-NEU, DUCON

Forschritte auf materialtechnologischer Seite wurden für Faserbeton, dessen Weiterentwicklung parallel jedoch unabhängig zum Ferrocement verlief, gleichermaßen erreicht. Eine deutliche Steigerung der Tragfähigkeit konnte jedoch weder durch Zugabe von Fasern noch durch Einsatz neuer Materialien bewirkt werden, da bei herkömmlicher Herstellung, in Form von Faserzugabe während des Mischprozesses, der Fasergehalt aufgrund der Verarbeitbarkeit den limitierenden Faktor hinsichtlich der Tragfähigkeitssteigerung darstellte. Daher wurden neue Verfahren (SIMCON/SIFCON) zur Herstellung faserbewehrter Betone entwickelt, die höhere Fasergehalte zuließen. Beim SIFCON-Verfahren (SIFCON = Slurry Infiltrated Fiber CONcrete) werden die Fasern in die Schalung eingestreut und anschließend mit einem Mörtel infiltriert, wobei eine Steigerung des Fasergehalts gegenüber herkömmlichen Faserbetonen (bis 3 Vol.-%) auf bis zu 18 Vol.-% ermöglicht wird [Lan84]. Bedingt durch den aufwändigen Herstellprozess des Faserstreuens, wurde das SIFCON-Verfahren jedoch dahingehend modifiziert, dass zunächst vorgefertigte Matten aus verwobenen Einzeldrahtfasern unterschiedlicher Länge hergestellt werden (SIMCON = Slurry Infiltrated Mat CONcrete), die nach dem Einbau in die Schalung, wie SIFCON, anschließend ebenfalls mit Mörtel infiltriert werden [HaFa92]. Vorteil von SIMCON ist daneben eine effektivere Ausnutzung der Fasern, da deren Ausrichtung im Vorfeld durch die Mattenstruktur vorgegeben ist. Zur Erzielung gleicher Tragfähigkeit benötigt damit ein im SIMCON-Verfahren hergestelltes Bauteil einen geringeren Stahlgehalt, als ein Bauteil, das mit dem SIFCON-Verfahren hergestellt wird. Herstellbedingt ist allerdings bei dem SIMCON-Verfahren der Fasergehalt auf ca. 6 Vol.-% begrenzt.

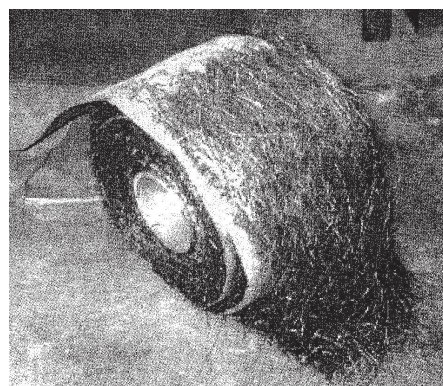


Abbildung 1.3: SIFCON (links) und SIMCON (rechts) [Na00]

Um Stahlgehalte von bis zu 20 Vol.-% realisieren zu können, wurde auf SIMCON aufbauend ein optimierter Fasermattenaufbau (SIMCON-NEU) entwickelt [Hau99]. Hierbei werden Einzelfasern von zwei Drahtgittermatten eingeschlossen. Diese beiden außenliegenden Drahtgittermatten werden durch Verbindungsdrähte derart miteinander verbunden, dass ein "vorgefertigtes Faserpaket" entsteht. Unter Verwendung von langen Fasern zwischen den Drahtgittern sind Fasergehalte zwischen 1,5 und 10 Vol.-% möglich, eine Zugabe von Kurzfasern lässt Fasergehalte zwischen 10 und 20 Vol.-% zu [Hau99]. Um den Herstellprozess weiter zu vereinfachen, wurde zusätzlich das DUCON-System (DUctile CONcrete) entwickelt [Hau99, Hau16]. Dabei wird vollständig auf die Zugabe von Einzelfasern verzichtet und stattdessen ein Mattenpaket aus Drahtgittermatten als Ersatz für die Einzelfasern zwischen den beiden außenliegenden Drahtgittermatten eingebaut. Eines der Merkmale des Systems ist, dass alle übereinanderliegenden Drahtgittermatten durch Drähte miteinander zu einem Mattenpaket verbunden sind.

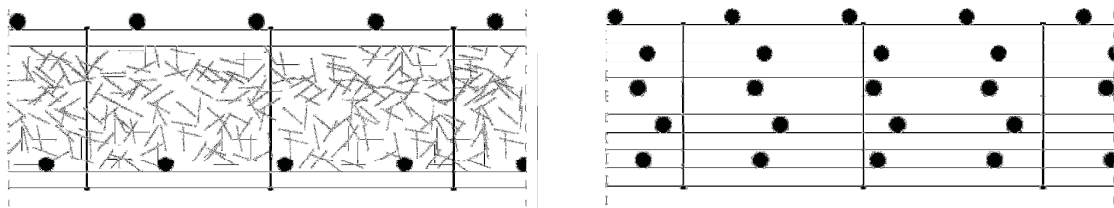


Abbildung 1.4: SIMCON NEU (links) und DUCON (rechts), gemäß [Hau99]

Im Standard-DUCON-Verfahren wird der Stahlgehalt von 1,5 bis 20 Vol.-% über die Maschenweite und den Durchmesser der Drahtgitter gesteuert. Zusätzlich werden Varianten vorgestellt, die Stahleinsparungen im Kern des Mattenpaketes durch Verwendung unterschiedlicher Mattentypen (Maschenweiten und Durchmesser) innerhalb eines Mattenpaketes oder durch Aufbiegungen mittig angeordneter Matten zur Erzeugung von Mattenhohlräumen erlauben.

Alle drei vorgestellten Verfahren zielen darauf ab, zur Steigerung der Tragfähigkeit einen hohen Stahlgehalt innerhalb des Betons unter Sicherstellung der Verarbeitbarkeit zu ermöglichen. Das DUCON-Verfahren, das gemäß Hauser [Hau99] eine Weiterentwicklung von Faserbeton (über SIFCON und SIMCON) darstellt, ist letztendlich in seinem Aufbau vergleichbar mit einem Ferrocement, bestehend aus dicht aneinander liegenden Drahtgittermatten, verfüllt mit einem leistungsstarken Feinkornbeton.

1.3 Zielsetzung und Inhalt der Arbeit

In der vorliegenden Arbeit wird, aufgrund der in Kapitel 1.1 aufgeführten Schwächen der üblicherweise in UHPC verwendeten Mikrodrahtfasern, eine Alternative durch Verwendung einer Mikrobewehrung in Form von Drahtgittermatten untersucht. Anders als die in den Kapiteln 1.2.2 und 1.2.3 vorgestellten Verfahren, die die kontinuierlichen und/oder diskontinuierlichen Drähte bzw. Drahtgittermatten zur Steigerung der Tragfähigkeit, insbesondere dünner Betonbauteile (Bauteildicke vorzugsweise 10 bis 25 mm), einsetzen, steht zunächst die effektive Möglichkeit des Stahlfaserersatzes durch die Mikrobewehrung im Fokus der Untersuchungen. Ferrocement sowie auch DUCON verfügen in der Regel über Stahlgehalte, die zum Teil erheblich über denen von herkömmlichen Stahlfaserbetonen liegen. In den dicht gepackten Mattenpaketen besitzen die einzelnen Gitterlagen nahezu keinen Abstand untereinander. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden hingegen vorrangig Stahlgehalte angestrebt, die eine Vergleichbarkeit zu stahlfaserbewehrtem UHPC zulassen. Ziel der Arbeit ist, neben der Prüfung der Effektivität des Faserersatzes auch die Untersuchung der Trag- und Verformungsfähigkeit von Bauteilen aus mikrobewehrtem Ultrahochleistungsbeton sowie die Ausarbeitung eines zugehörigen Bemessungskonzeptes.

Gemäß dem angestrebten Ziel ergibt sich der folgende Aufbau der Arbeit:

Im folgenden Kapitel 2 sind zunächst wesentliche Eigenschaften des unbewehrten UHPC zusammengestellt. Die maßgebenden Charakteristiken, die die Zugabe von Mikrodrahtfasern erfordern würden, sind durch Einbau einer Mikrobewehrung derart zu beeinflussen, dass auf den Einsatz dieser Mikrodrahtfasern verzichtet werden kann.

Die Effektivität des Faserersatzes wird in Kapitel 3 anhand von Ergebnissen experimenteller Untersuchungen gezeigt. Sowohl Aspekte der Tragfähigkeit als auch solche der Dauerhaftigkeit werden vergleichend bewertet.

An die experimentellen Untersuchungen schließt in Kapitel 4 die analytische Beschreibung des Tragverhaltens an. Hier werden die aus den Versuchen ermittelten Zusammenhänge mathematisch formuliert.

In Kapitel 5 werden die numerischen Studien in Form von physikalisch nichtlinearen Finite Elemente Berechnungen dargestellt. Grundlage der Berechnungen bilden die in den Versuchen ermittelten Materialkennwerte sowie die in Kapitel 4 formulierten Gesetzmäßigkeiten. Die zur Berechnung herangezogenen Materialmodelle zur Simulation des Materialverhaltens werden zusätzlich anhand von Versuchen kalibriert. Durch die

Simulation lässt sich der Einfluss unterschiedlicher Parameter auf das Trag- und Verformungsverhalten von Bauteilen aus mikrobewehrtem Ultrahochleistungsbeton überprüfen.

Aufbauend auf den experimentellen und numerischen Untersuchungen wird in Kapitel 6 das entwickelte Modell zur Bemessung mikrobewehrter Ultrahochleistungsbetonbauteile vorgestellt.

Kapitel 2

Ultrahochleistungsbeton (UHPC)

2.1 Allgemeines

Untersuchungen, die in den achtziger und neunziger Jahren des letzten Jahrhunderts maßgeblich in Kanada und Frankreich durchgeführt wurden ergaben, dass durch eine geeignete Mischungszusammensetzung, Betone mit extrem hohen Festigkeiten und verbesserten Dauerhaftigkeitseigenschaften herstellbar sind [Ba87, RiCh95, CMF95, Bon96]. Durch gezielte Abstimmung der Ausgangsstoffe aufeinander werden Gefügestörungen, wie Porenräume und Mikrorisse, die die Schwachstellen der Betonmatrix darstellen, auf ein Minimum reduziert. Die Bezeichnung dieser Betone als „Reaktionspulverbeton“ (engl.: Reactive Powder Concrete (RPC) bzw. frz.: Béton de Poudres Réactives (BPR)) beruht auf dem Einsatz einer Kombination aus reaktiven sowie inerten Feinststoffen und einer Begrenzung des Größtkorndurchmessers auf 0,6 mm. Das äußerst dichte Gefüge entsteht zum einen durch die optimierte hohlraumarme Kornpackung und zum anderen durch einen niedrigen Wasser/Bindemittel-Wert in Kombination mit dem Einsatz wirksamer Zusatzmittel zur Einstellung der Konsistenz. Die gezielte Abstimmung der homogen verteilten Feinstpartikel und der geringe Porengehalt ermöglichen die Festigkeitssteigerung, eine erhöhte Dichtigkeit und Dauerhaftigkeit sowie einen erhöhten Widerstand gegen Frost-Taubeanspruchungen und mechanischen Angriff. Daneben ist diese Dichtigkeit jedoch auch für das spröde Materialverhalten verantwortlich. Als Folge der schlagartigen Rissausbreitung versagen Bauteile aus unbewehrtem RPC ohne Vorankündigung. Um ein duktileres Materialverhalten zu gewährleisten werden üblicherweise Fasern aus metallischen oder organischen Materialien der Mischung zugegeben. Diese Fasern haben die vornehmliche Aufgabe, die Bildung von

Makrorissen zu verhindern bzw. zu verzögern und das Nachbruchverhalten zu verbessern.

Ultrahochleistungsbeton stellt eine Weiterentwicklung des RPC dar. Genau wie RPC ist UHPC ein 5-Stoff-System, bestehend aus Zement, Zusatzstoffen und Zusatzmitteln, Wasser und einer Gesteinskörnung. Zur Herstellung von UHPC kann jedoch anders als im Fall von RPC das Größtkorn bis zu 16 mm messen. Anhand des Größtkorns (≤ 1 mm bzw. > 1 mm) wird zwischen feinkörnigem und grobkörnigem UHPC unterschieden [Schm08].

Genau wie RPC enthält UHPC zur Sicherstellung der Duktilität üblicherweise einen Faserzusatz, der jedoch aufgrund der in Kapitel 1.1 aufgeführten Schwächen im Rahmen dieser Arbeit durch eine Mikrobewehrung ersetzt wird. Diese alternative Bewehrungsvariante erfordert infolge geringer Maschenweiten der Mikrobewehrung die Verwendung eines feinkörnigen UHPC.

2.2 Regelwerke

Die Herstellung und Eigenschaften von Betonen mit Druckfestigkeiten bis zu C100/115 werden durch die DIN EN 206 [DIN206] geregelt. Ultrahochleistungsbeton, der Druckfestigkeiten von mindestens 150 N/mm² erreicht, fällt mit seinen Eigenschaften somit nicht mehr in den Anwendungsbereich der DIN EN 206 [DIN206]. Auch die Vorgaben zur Bemessung von Betonbauteilen, geregelt in der DIN EN 1992-1 [DIN1992], gelten in Deutschland nur bis zu einer Betonfestigkeitsklasse C100/115. In Deutschland ist der Einsatz von UHPC daher nicht genormt, sodass eine Anwendung einer bauaufsichtlichen Zulassung oder einer Zustimmung im Einzelfall bedarf. Im Jahr 2008 wurde ein erster Schritt in Richtung „Regelung“ bzw. „Empfehlung“ unternommen: Erste Ergebnisse und Erkenntnisse, die im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Schwerpunktprogramms (SPP 1182) „Nachhaltiges Bauen mit ultrahochfestem Beton“ gewonnen wurden, erschienen 2008 zusammengefasst in dem „Sachstandsbericht Ultrahochfester Beton“ [Schm08]. Mit Abschluss des Schwerpunktprogramms im Jahr 2012 wurden aktuelle Forschungsergebnisse in Kapitel 9 des Beton-Kalenders 2013 [FeSW13] berücksichtigt. Alle im Rahmen des Schwerpunktprogramms erzielten Ergebnisse sind im zugehörigen Abschlussbericht [ScFe14] zusammengefasst.

In Australien wurde im Jahr 2000 ein Leitfaden zur Bemessung von vorgespannten Betonbalken aus RPC ("Design Guidelines for Ductal Prestressed Concrete Beams" [Go-Gi00]), angelehnt an das Sicherheitskonzept der australischen Norm, veröffentlicht und in Frankreich existiert seit 2013 ein Leitfaden mit angepassten Bemessungsansätzen für faserbewehrten UHPC [AFGC13]. Noch unveröffentlicht ist ein Bericht („Bulletin on Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete“) des Gremiums *fédération internationale du béton* (fib), der Empfehlungen zur Bemessung und Konstruktion faserbewehrter Ultrahochleistungsbetone, orientiert an der Struktur des Model Code 2010 [MC10], enthalten soll.

Seit 2006 ist die japanische Empfehlung für faserbewehrten Ultrahochleistungsbeton als Entwurf („Recommendations for Design and Construction of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Structures (Draft)" [JSCE06]) in englischer Sprache erhältlich.

Im März 2016 wurde durch den Schweizer Ingenieur- und Architektenverein (SIA) das Merkblatt SIA 2052 "Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) - Baustoffe, Bemessung und Ausführung" [SIA2052] veröffentlicht.

Alle genannten Regelwerke gehen von einer Faserbewehrung des UHPC aus. Um das Trag- und Verformungsverhalten von Bauteilen aus mikrobewehrtem Ultrahochleistungsbeton analytisch beschreiben und entsprechende Bemessungsansätze formulieren zu können (Kapitel 6), werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit zunächst Ergebnisse experimenteller (Kapitel 3) und numerischer Untersuchungen (Kapitel 5) vorgestellt. Grundlage aller experimentellen Untersuchungen bilden dabei die in Kapitel 2.3 beschriebenen UHPC-Mischungen.

2.3 Verwendete UHPC-Mischungen

Ziel der vorliegenden Arbeit ist der Ersatz von Mikrodrahtfasern durch eine Mikrobewehrung in UHPC. Um die Leistungsfähigkeit eines mikrobewehrten UHPC bewerten zu können, kommt daher neben einer faserfreien Mischung (M1) eine Mischung mit Fasern (M1-F) zum Einsatz. Aus Gründen der Vergleichbarkeit ist der Stahlfaseranteil von 2,4 Vol.-% bei der Stoffraumrechnung berücksichtigt.

Alle in Kapitel 3 durchgeführten Untersuchungen beruhen auf den in Tabelle 2.1 angegebenen Mischungen. Diese Mischungen sind angelehnt an die Mischung M2Q [FeSc05],

die im Rahmen des von der DFG geförderten Schwerpunktprogramms „Nachhaltiges Bauen mit ultra-hochfestem Beton“ verwendet wurde.

Tabelle 2.1: Verwendete UHPC-Mischungen [kg/m³] basierend auf [FeSc05]

	M1	M1-F
Zement CEM I 52,5R HS-NA	832	812
Quarzsand 0,125/0,500 mm	1050	1023
Microsilica	108	105
Quarz I (Feinquarz W12)	240	234
Fließmittel Glenium51	23,5	23,0
Wasser	166	162
Stahlfasern	-	192

Der Wasser/Zement-Wert beider Mischungen beträgt unter Anrechnung des Wasseranteils des Fließmittels 0,22, während der Wasser/Bindemittel-Wert bei 0,15 liegt.

2.3.1 Ausgangsmaterialien

Zement

Der verwendete Portlandzement CEM I 52,5R HS-NA weist einen niedrigen Gehalt (bis zu 1,5 M.-%) an Tricalciumaluminat (C₃A) auf. Eine sekundäre Ettringitbildung durch Reaktion des Hydratationsproduktes Monosulfat mit angreifendem Sulfat wird so unterbunden. Neben dem hohen Sulfatwiderstand besitzt dieser Zement ebenfalls einen geringeren Wasseranspruch und eine niedrigere Wärmeentwicklung als andere Zementarten, was zu einer verbesserten Verarbeitbarkeit führt. Da die Herstellung von Ultrahochleistungsbeton eine Reduzierung des Wasser/Zement-Wertes bedingt, kommt ein Zementgehalt von über 800 kg/m³ gemäß Tabelle 2.1 zum Einsatz.

Quarzsand

Als Gesteinskörnung wird in den Mischungen M1 und M1-F ein Quarzsand verwendet. Quarzsande eignen sich aufgrund ihrer hohen Eigenfestigkeit des Gesteins sowie der Bildung einer optimalen Übergangszone zwischen Zuschlagkorn und Bindemittelmatrix insbesondere zur Herstellung von Ultrahochleistungsbetonen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde gezielt ein Kornband 0,125/0,5 mm ausgewählt, das den Anforderungen an den Einsatz in mikrobewehrtem UHPC gerecht wird. Der Durchmesser des Größtkorns (0,5 mm) entspricht maximal dem halben Durchmesser der Mikrobewehrung und maximal 1/20 der Maschenweite.

Mikrosilika

Durch die Zugabe von Mikrosilika wird zum einen die Packungsdichte der Matrix verbessert und zum anderen die Kontaktzone zwischen Zuschlagkorn und Matrix weiter optimiert. Der reaktive Silikastaub besitzt eine äußerst geringe Partikelgröße (mittlerer Partikeldurchmesser $\sim 0,5 \mu\text{m}$) und erlaubt daher eine Füllung der feinsten Hohlräume zwischen Zement und Sand, sodass die Packungsdichte durch den Mikrofüllereffekt erhöht werden kann. Daneben werden durch die puzzolanische Reaktion des bei der Zementhydratation entstehenden Calciumhydroxids Ca(OH)_2 mit dem Mikrosilika SiO_2 weitere festigkeitssteigernde Calciumsilikathydrat CSH-Phasen gebildet. Eine Wärmebehandlung kann diesen Prozess beschleunigen. Durch den verbesserten Verbund zwischen Zuschlag und Matrix erfolgt der Bruch hochfester und ultrahochfester Betonproben nicht wie bei Normalbeton entlang der Kontaktzone, sondern durch den Zuschlag hindurch.

Mit steigendem Kohlenstoffgehalt des Silikastaubes verschlechtern sich jedoch die rheologischen Eigenschaften des Bindemittelleims [deLa92]. Eine Erhöhung des Wasseranspruchs sowie eine stark klebrige Konsistenz sind Indizien für verunreinigtes Mikrosilika.

Das verwendete Mikrosilika Elkem Grade 983 weist einen Kohlenstoffgehalt von maximal 0,5 % auf. Um Agglomerationen während des Mischprozesses zu vermeiden, wird das Mikrosilika vor Mischbeginn fein gesiebt.

Quarzmehl

Das zugegebene Feinquarz weist eine mit dem Zement vergleichbar hohe spezifische Oberfläche auf und verbessert durch günstige Kornpackung der Feinstoffe die Festigkeitsentwicklung des Ultrahochleistungsbetons [RiCh95]. Der Einsatz einer Wärmebehandlung unter hohen Temperaturen führt dazu, dass sich der unter normalen Bedingungen inerte Zusatzstoff Feinquarz in Kombination mit dem Mikrosilika an der puzzolanischen Reaktion beteiligt.

Fließmittel

Um die Verarbeitbarkeit trotz des geringen Wasser/Bindemittel-Wertes sicherzustellen, sind wirksame Fließmittel erforderlich. Das verwendete Fließmittel Glenium 51 basiert auf Polycarboxylatether (PCE) und zählt damit zu einem Fließmittel der „neuen Generation“. Wie Naphthalin- und Melaminsulfonate, die bereits in den 40er bzw. 60er Jahren als Fließmittel verwendet wurden, werden die negativ geladenen Polymermoleküle an der Zementoberfläche adsorbiert. Durch die elektrostatische Abstoßung zwischen den Zementkörnern wird deren Agglomeration verhindert. Der Molekülaufbau (Länge der Haupt- und Seitenkette sowie Ladungsdichte (= Carboxylatgruppe/Polyetherkette)) ist maßgebendes Kriterium für das Adsorptionsverhalten der Fließmittel auf PCE-Basis. Eine hohe Anzahl an Carboxylatgruppen in Kombination mit kurzen Seitenketten erhöht die verflüssigende Wirkung.

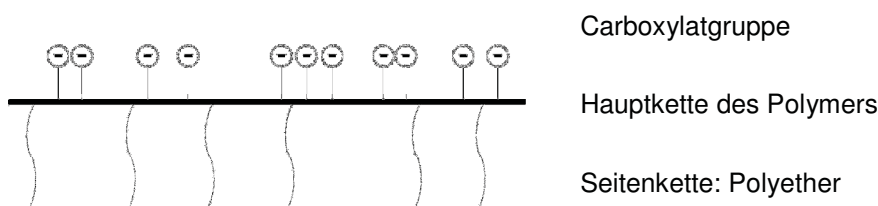


Abbildung 2.1: Aufbau eines Polycarboxylatethers

Neben der elektrostatischen Abstoßung bewirken Fließmittel auf PCE-Basis auch eine sterische Abstoßung der Zementkörner durch die langen Seitenketten des Polymers und verbessern so die Dispergierfähigkeit.

Bei der Wahl des Fließmittels ist auf eine „Verträglichkeit“ mit dem verwendeten Zement zu achten, um die Effektivität der Wassereinsparung, des Konsistenzerhalts sowie eine angemessene Verarbeitungszeit zu gewährleisten.

Fasern

Die Mischung M1-F enthält gerade Mikrodrahtfasern mit glatter Oberfläche und einer Zugfestigkeit von 2200 N/mm². Die Fasern weisen einen Durchmesser von 0,15 mm und eine Länge von 9 mm auf. Die resultierende Faserschlankheit

$$\lambda_f = l_f/d_f$$

beträgt 60. Zwar sind Schlankheiten bis zu einem Wert von 100 realisierbar, jedoch nimmt die Einmischbarkeit der Fasern und die Verarbeitbarkeit des Frischbetons ab einem Wert oberhalb von 60 durch eine erhöhte Gefahr der Igelbildung ab. Der Fasergehalt der Mischung M1-F liegt konstant bei 2,4 Vol.-%.

Mikrobewehrung

Bei der verwendeten Mikrobewehrung handelt es sich um Stahldrahtgittermatten (S235), bestehend aus durch Punktschweißen zusammengefügt dünnen Einzeldrähten. Innerhalb der vorliegenden Arbeit wurden verschiedene Mikrobewehrungstypen, variierend in Durchmesser und Maschenweite untersucht.

Tabelle 2.2: Verwendete Mikrobewehrungstypen

Mikrobewehrungstyp	Ø [mm]	lichte Maschenweite [mm]
MB1	1,0	10
MB3	1,5	16
MB4	1,5	20
MB5	2,0	20

Für einen Vergleich zwischen faser- und mikrobewehrtem Ultrahochleistungsbeton wird stets Typ MB1 herangezogen, da hierbei die Drähte den geringsten Durchmesser

aufweisen. Alle weiteren Mikrobewehrungstypen kommen zum Einsatz, um den Einfluss des Durchmessers sowie den der Maschenweite detailliert untersuchen zu können. Einzelversuche an der Mikrobewehrung (Kapitel 3.2) zeigen deren Spannungs-Dehnungs-Verhalten.

2.3.2 Herstellung

Allgemeines

Um einen Ultrahochleistungsbeton mit seinen charakteristischen Eigenschaften herzustellen, bedarf es im Vergleich zu Normalbeton besonderer Sorgfalt. Infolge des hohen Anteils an Feinststoffen (mit großer Oberfläche) in Kombination mit einem auf diese Oberfläche bezogenen geringen Wasseranteil, ist für den Mischprozess ein leistungstarker Mischer zu wählen, um Feinststoffe und Zusatzmittel gleichmäßig zu verteilen. Die eingebrachte Mischenergie sowie die Mischreihenfolge sind bei der Herstellung von UHPC ebenfalls von besonderer Bedeutung [MaS08], um eine möglichst optimale Verarbeitbarkeit unter gleichzeitiger Sicherstellung hoher Druckfestigkeiten zu erzielen. Schlussendlich unterscheidet sich auch der weitere Transport und Einbau aufgrund des zäh fließenden, klebrigen Ultrahochleistungsbetons von Normalbeton.

Nachfolgend wird der Herstellprozess der in Kapitel 3 untersuchten Probekörper erläutert.

Mischprozess

Um eine Vergleichbarkeit aller Probenserien zu gewährleisten, sind Trockenstoffe, Mischregime, Mischertyp, sogar Mischerfüllgrad sowie die Temperatur der Ausgangsmaterialien stets identisch.

In Voruntersuchungen wurde festgestellt, dass das in Tabelle 2.3 gegebene Mischregime beste Ergebnisse hinsichtlich Verarbeitbarkeit sowie Luftporengehalt liefert.

Tabelle 2.3: Mischregime der verwendeten Mischungen

Tätigkeit	Dauer	Dauer gesamt [min]
Trockenstoffe mischen	2 Minuten	0 – 2,0
Wasser + 50 % FM hinzufügen	Zugabe innerhalb von 30 s	2,0 – 2,5
Mischen	2 Minuten	2,5 – 4,5
Restliches FM hinzugeben	Zugabe innerhalb von 30 s	4,5 – 5,0
Mischen	3,5 Minuten	5,0 – 8,5
Mischpause	1,5 Minuten	8,5 – 10,0
Mischen (und gegebenenfalls Fasern einrieseln lassen)	1,5 Minuten (kann durch Faserzugabe bis zu 3 Minuten andauern)	10,0 – 11,5 bzw. -13

Nach einer Vermischung aller trockenen Bestandteile wird das Wasser zusammen mit einem Teil des Fließmittels zugegeben. Durch die vorherige Mischung von Wasser und Fließmittel kann eine Agglomeration des Mikrosilikas gezielt unterbunden werden. Die beste Wirksamkeit des restlichen Fließmittels wird erzielt, wenn dessen Zugabe mit zeitlicher Verzögerung erfolgt und die Zementoberflächen über einen entsprechend langen Wasserkontakt verfügen. Eine Ruhephase vor dem letzten Durchmischen führt zu einer effektiveren Wirkung der zweiten Fließmitteldosierung, ohne die Wirksamkeit des zu Beginn zugegebenen Fließmittels durch zu lange Mischzeit zu reduzieren.

Die relativ lange Mischzeit von insgesamt 11,5 Minuten kann unter normalen Umgebungsbedingungen zu Frischbetontemperaturen von bis zu 30 °C führen und damit die Verarbeitung und anschließende Qualität des Ultrahochleistungsbetons herabsetzen. Um eine gute Verarbeitbarkeit, eine ausreichend lange Verarbeitungszeit und eine Vergleichbarkeit aller Serien sicherzustellen, werden für alle im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Mischungen die Ausgangsmaterialien auf 5 °C vorgekühlt, woraus eine Frischbetontemperatur von 21 °C resultiert.

Bei dem verwendeten Mischer handelt es sich um einen Intensivmischer mit 150 Liter Fassungsvermögen der Marke Eirich. Alle Mischungen werden im Gleichstrom hergestellt, wobei der Sternwirbler und der Teller des Mixers, bis auf einen Zeitraum von 30 Sekunden nach der ersten Fließmitteldosierung, mit einer langsamen

Geschwindigkeit (133 U/min bzw. 21 U/min) rotierten. Nach der ersten Fließmittelzugabe wird die Mischgeschwindigkeit kurzzeitig auf 266 U/min (Wirblerwerkzeug) bzw. 42 U/min (Mischsteller) erhöht, um die Wasser-Fließmittelmischung schneller zu verteilen.

Aus Gründen der Vergleichbarkeit beträgt der Mischerfüllgrad aller Mischungen stets 50 %, entsprechend 75 Liter Frischbeton.

Einbau und Nachbehandlung

Um den Lufteintrag möglichst gering zu halten und dem Beton die Möglichkeit zu geben, während des Einbaus möglichst viel Luft abzugeben, fließt der Frischbeton direkt vom Mischer aus ohne Unterbrechung in die Schalung. Nach dem Einfüllen werden alle der direkten Außenluft ausgesetzten Oberflächen mit Wasser benetzt, um die Bildung einer so genannten Elefantenhaut zu vermeiden.



Abbildung 2.2: Einfüllen ohne Unterbrechung des Betonstroms

Zwar besitzt der Ultrahochleistungsbeton eine gute Fließfähigkeit, die klebrige Konsistenz hindert allerdings Luftbläschen am Aufstieg an die Oberfläche, sodass ein mechanisches Verdichten durch Außen- oder Innenrüttler in jedem Fall notwendig ist. Da ein Verdichten mittels Innenrüttler bei mikrobewehrten Proben nicht möglich ist, werden alle im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Proben zwei Minuten lang bei geringer Rüttelfrequenz (50 Hz) auf einem Rütteltisch verdichtet.

Für die Nachbehandlung der Proben werden zwei verschiedene Varianten gewählt: standard bzw. wärmebehandelt. Die Standardlagerung erfolgt gemäß DIN EN 12390-2 [DIN12390-2]. Um eine Vergleichbarkeit aller Proben, die nach der Variante „standard“ nachbehandelt werden zu gewährleisten, verbleiben diese bei einer Raumtemperatur von 20 °C für 24 Stunden in der Schalung, wobei sie vor dem Austrocknen geschützt werden. Nach dem Ausschalen werden die Proben bis zur Prüfung in einem auf 20 °C temperiertem Wasserbad auf Rosten gelagert. Bei der Variante „wärmebehandelt“ werden die Probekörper direkt nach dem Ausschalen, um einen Wasserverlust zu vermeiden, luftdicht verpackt und anschließend einer Wärmebehandlung unterzogen. Innerhalb von 8 Stunden wird dabei die Temperatur von 40 bis auf 90 °C gesteigert, für 48 Stunden auf 90 °C gehalten und anschließend über einen Zeitraum von 20 Stunden auf 20 °C abgesenkt. Bis zur Prüfung lagern die Proben anschließend in 20 °C warmem Wasser. Durch die Wärmebehandlung wird zum einen die puzzolanische Reaktion des Mikrosilikas beschleunigt, zum anderen kommt es zu einer Verbesserung der Mikrostruktur der entstehenden festen Hydratphasen. Die stufenweise Erwärmung und Abkühlung soll thermisch bedingte Mikrorissbildung verhindern.

2.3.3 Frischbetoneigenschaften

Um eine Aussage über die Verarbeitbarkeit treffen zu können, werden die rheologischen Eigenschaften des frischen UHPC untersucht. Unmittelbar nach dem Mischprozess beträgt das Setzfließmaß nach DAfStb-Heft 516 [Rei01] mit einer Anordnung des Setztrichters nach unten (um einem Aufschwimmen des Trichters entgegenzuwirken und um das Befüllen zu erleichtern) für die Mischung M1 88 cm. Die Mischung mit Fasern (M1-F) weist ein etwas geringeres Setzfließmaß von 82 ± 2 cm auf. Die dynamische Viskosität, bzw. die Zeit T_{50} [Rei01], die der Beton benötigt, um einen Durchmesser von 50 cm zu erreichen, liegt bei beiden Mischungen um 5 Sekunden. Damit weist der hergestellte UHPC die Fließfähigkeit eines selbstverdichtenden Betons auf. Allerdings entspricht die Entlüftungsfähigkeit nicht der eines selbstverdichtenden Betons, weshalb ein Rütteln erforderlich ist. Der Luftporengehalt (LP) nach zweiminütiger Verdichtung mittels Rütteltisch beträgt für die Mischung M1 2,5 Vol.-%, bzw. für die Mischung M1-F mit Fasern 3,8 Vol.-% (geprüft nach [DIN12350-7]). An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass diese LP-Gehalte nur unter strenger Einhaltung des in Kapitel 2.3.2 beschriebenen Herstellprozesses erreicht werden können. Es ist zu beachten, dass

erhöhte LP-Gehalte zu einem Festigkeitsverlust führen. Um geringere Luftporengehalte zu erzielen, besteht die Möglichkeit der Verwendung eines Vakuummischers.

2.3.4 Temperaturentwicklung infolge Hydratation

Neben der Verarbeitbarkeit wird auch die Temperaturentwicklung infolge Hydratation untersucht. Unter Verhinderung von Wärmeabgabe und Wärmeaufnahme (Abbildung 2.3) wird der adiabatische Temperaturverlauf (Abbildung 2.4) ermittelt.

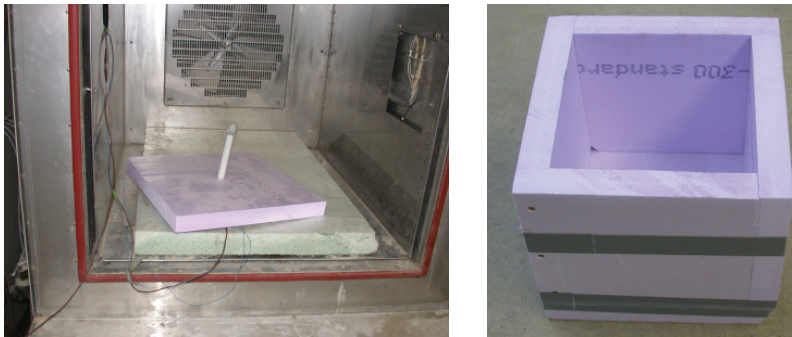


Abbildung 2.3: Temperaturfühler zur Aufnahme der Kerntemperatur und Steuerung des Klimaschranks (links), Schalung (rechts)

Unmittelbar nach der Herstellung wird der frische UHPC in eine Würfelschalung (Kantenlänge 30 cm) aus wärmedämmendem Material gefüllt (Abbildung 2.3, rechts). Zur Aufnahme der Betonkerntemperatur wird ein Temperaturmesselement zentrisch innerhalb des Frischbetonwürfels platziert. Dieses Messelement steuert gleichzeitig die Temperatur innerhalb des Klimaschranks. Über diese Konstruktion wird anschließend ein weiterer Kasten aus wärmedämmendem Material platziert.

Abbildung 2.4 zeigt den Temperaturanstieg nach dem Einfüllen des frischen UHPC.

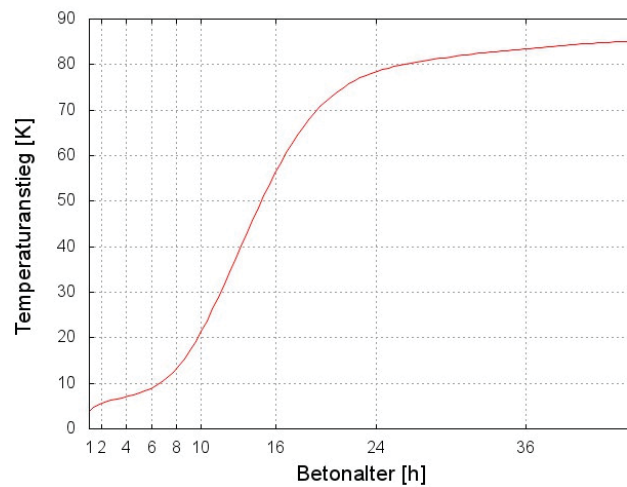


Abbildung 2.4: Adiabatischer Temperaturanstieg des UHPC, Mischung M1 (Ausgangstemperatur 21 °C), Betonalter logarithmischer Maßstab

Aufgrund des geringen Wasser/Bindemittel-Wertes entsteht ein Wassermangel, sodass die Hydratation bereits nach 25 Stunden nahezu abgeschlossen ist. Ein großer Teil des Zementes bleibt zunächst unhydratisiert und wirkt als feste Gesteinskörnung. Hohe Festigkeiten können schon nach wenigen Tagen der Herstellung erreicht werden. Die Nacherhärtung von UHPC verläuft deutlich langsamer als bei Normalbeton, da vorhandenes Wasser durch bereits hydratisierte Schichten diffundieren muss, um weitere Zementpartikel zu erreichen. Der geringe Anteil an Kapillarporen erschwert zudem eine Aufnahme der Umgebungsfeuchte.

Das Temperaturgefälle von 85 Kelvin, das in Abbildung 2.4 aufgetragen ist, kann vor allem mit dem hohen Zementgehalt begründet werden. Zum Vergleich: ein C35/45 (mit 300 kg/m³ CEM I 42,5 R) weist nur eine Temperaturdifferenz von 35 Kelvin auf [Kö01]. Für die Praxis bedeutet die hohe Temperaturdifferenz die Gefahr der Mikrorissbildung infolge temperaturbedingter Zwangsspannungen, insbesondere bei massigen Bauteilen.

Kapitel 3

Experimentelle Untersuchungen

3.1 Allgemeines

Um eine Aussage über das Trag- und Verformungsverhalten des Verbundwerkstoffs "mikrobewehrter UHPC" treffen zu können, sind zunächst beide Komponenten, Mikrobewehrung und UHPC, getrennt voneinander zu untersuchen. Zusätzlich sind die Verbundeigenschaften zwischen beiden Materialien zu analysieren.

Im vorliegenden Kapitel 3 sind wesentliche Ergebnisse experimenteller Untersuchungen zusammenfassend dargestellt. Eine detaillierte Übersicht über die Einzelversuche ist in Anhang A zusammengestellt.

Stahlgehalt

Um den direkten Vergleich zwischen faserbewehrtem und mikrobewehrtem UHPC zu ermöglichen, werden Untersuchungen zur Druck-, Zug- und Biegezugfestigkeit sowie zum E-Modul und der Dauerhaftigkeit an faserbewehrten und mikrobewehrten Proben mit identischem Stahlgehalt durchgeführt. Die Umrechnung erfolgt dabei folgendermaßen:

Der Stahlgehalt bei Faserzugabe wird stets in Vol.-% angegeben und ist nicht zu verwechseln mit der im Massivbau üblichen Angabe des geometrischen Bewehrungsgrades (z. B. Längsbewehrungsgrad ρ_l). Für die verwendete faserbewehrte Mischung M1-F sind unter Annahme einer Dichte der Stahlfasern von $7,85 \text{ kg/dm}^3$ in einem Kubikmeter UHPC $0,024 \text{ m}^3$ Stahlfasern, entsprechend 2,4 Vol.-% enthalten. Um den gleichen Stahlgehalt durch Mikrobewehrung zu erzielen, sind unter der Voraussetzung einer identischen Dichte von Mikrobewehrung und Stahlfasern, wie in der faserbewehrten

Mischung M1-F ebenfalls 192 kg Stahl erforderlich. Beispielhaft soll für einen Würfel der Kantenlänge 10 cm die erforderliche Anzahl an Mikrobewehrungsmatten bestimmt werden. Um die Matten in die Würfelschalung einbauen zu können, sollen die Matten die Abmessung 9,5 cm x 9,5 cm besitzen. Für den Fall, dass beispielsweise der Mikrobewehrungstyp MB1 (Ø 1,0 mm, lichte Maschenweite 10 mm) verwendet wird, ergibt sich das Volumen der Mikrobewehrung je Draht der Länge 95 mm zu:

$$\frac{\pi \cdot 1^2}{4} \cdot 95 = 74,61 \text{ mm}^3.$$

Infolge der Maschenweite liegen bei günstigem Schnitt jeweils 9 Drähte in jede der beiden Richtungen, was zu einem Gesamtvolumen je Matte von 1343,03 mm³ führt. Mit einer Dichte von $7,85 \cdot 10^{-3} \text{ g/mm}^3$ wiegt eine Matte des Typs MB1 mit den Abmessungen 9,5 cm x 9,5 cm 10,54 g. Wenn ein Kubikmeter UHPC 192 kg Stahl enthalten soll und der Würfel ein Volumen von $1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ aufweist, dann müssen 0,192 kg Stahl in Form der Mikrobewehrung eingelegt werden. Die Anzahl der Matten der Größe 9,5 cm x 9,5 cm und des Typs MB1 errechnet sich wie folgt:

$$\frac{192 \text{ g}}{10,54 \text{ g}} = 18,21 \text{ Matten}.$$

Versuchsdurchführung

Es ist zu erwähnen, dass die im vorliegenden Kapitel dargestellten, aus last- oder weggesteuerten Versuchen resultierenden Diagramme in ihren Anfangsbereichen aufgrund von Gegenkrümmungen im Ursprung (Abbildung 3.1) nachbearbeitet wurden. Hierzu wurde die lineare Steigung nach unten verlängert und die Ordinate entsprechend in den „neuen Ursprung“ verschoben. Diese hohle Krümmung zur Ordinatenachse hin, die auch als „nichtlinearer Anlauf“ im Versuch bezeichnet wird, kann auf zahlreiche Effekte zurückgeführt werden, deren Erläuterung detailliert beispielsweise durch Grübl [GrWk01] erfolgt.

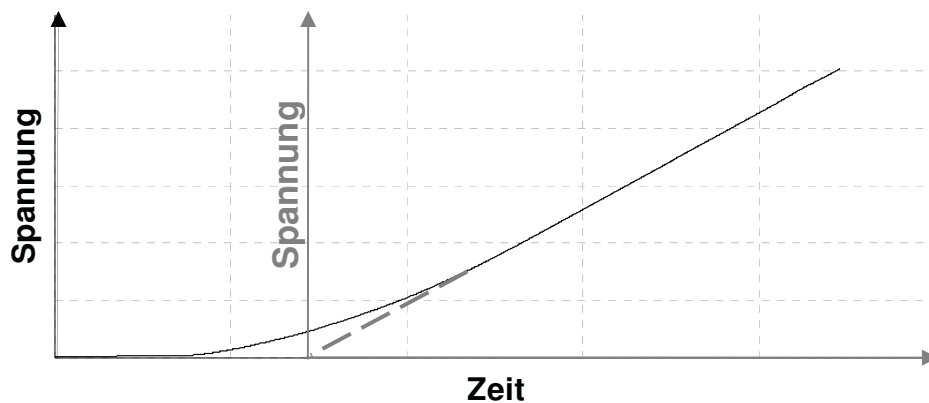


Abbildung 3.1: „Nichtlinearer Anlauf“ im Versuch und nachbearbeiteter Verlauf (gestrichelt grau)

Aufgrund fehlender Normen zur Prüfung von UHPC (Frisch- sowie Festbeton) werden die Bauteilprüfungen gemäß den geltenden Normen für Normalbeton bzw. Stahlfaserbeton durchgeführt.

3.2 Materialverhalten der Mikrobewehrung

Die Mikrobewehrung besteht aus einem normalduktilen Stahl S235. Um die mechanischen Kennwerte der verwendeten Mikrobewehrung zu ermitteln, werden zentrische Zugversuche durchgeführt. Die DIN EN ISO 6892-1 – „Metallische Werkstoffe – Zugversuch- Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur“ [DIN6892] regelt in Anhang C die Probenarten für Drähte mit einem Durchmesser unter 4 mm. Hieraus ergibt sich für die Mikrobewehrung eine Anfangsmesslänge L_0 von 100 mm. Aufgrund des geringen Durchmessers ist eine Messung der Dehnung bzw. Längenänderung im einaxialen Zugversuch mittels extern an die Mikrobewehrung angeklebter induktiver Wegaufnehmer nicht möglich. Zur Aufnahme der Wegänderung wird daher eine optische Messung durchgeführt. Dabei wird die Probe mit zwei Reflexionspunkten, den Messpunkten (Abstand = 100 mm), versehen. Über zwei Laser, die die Messpunkte kontinuierlich anvisieren, wird der Abstand der beiden Messpunkte aufgezeichnet und über die Anfangsmesslänge die zugehörige Dehnung ermittelt. Die aufgebrachte Kraft wird per Kraftmessdose ermittelt und ebenfalls kontinuierlich aufgezeichnet. Über den Anfangs-

querschnitt der Probe kann die zugehörige Spannung berechnet werden. Die Einschnürung des Drahtes bleibt unberücksichtigt.

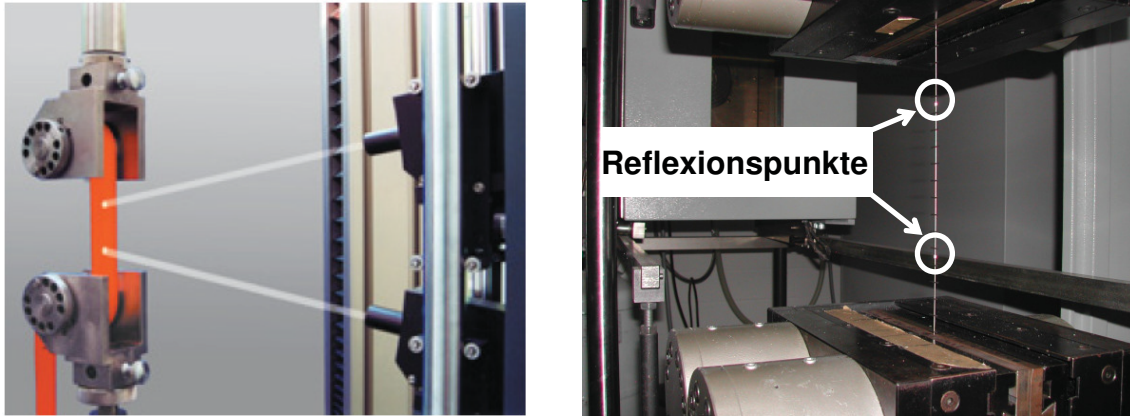


Abbildung 3.2: Prinzip der Wegänderungsmessung (links), Probe im Versuch (rechts)

Da die Fließgrenze sowie die Zugfestigkeit von der Dehnungszunahmegeschwindigkeit abhängen, werden unterschiedliche Dehngeschwindigkeiten von $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ bis $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ untersucht. Aus Abbildung 3.3 geht hervor, dass aus langsameren Belastungsgeschwindigkeiten geringe zugehörige Spannungen resultieren. Die Differenz in der Maximalspannung zwischen der langsamsten und der schnellsten Belastungsgeschwindigkeit beträgt für die betrachteten Proben ca. 40 N/mm^2 . Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass gemäß [DIN6892] zur Ermittlung der Zugfestigkeit eine Dehngeschwindigkeit von $8 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ nicht überschritten werden darf. Nachfolgend wird der in Abbildung 3.3 rot markierte, mittlere Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Linie zur Charakterisierung der Mikrobewehrung angesetzt.

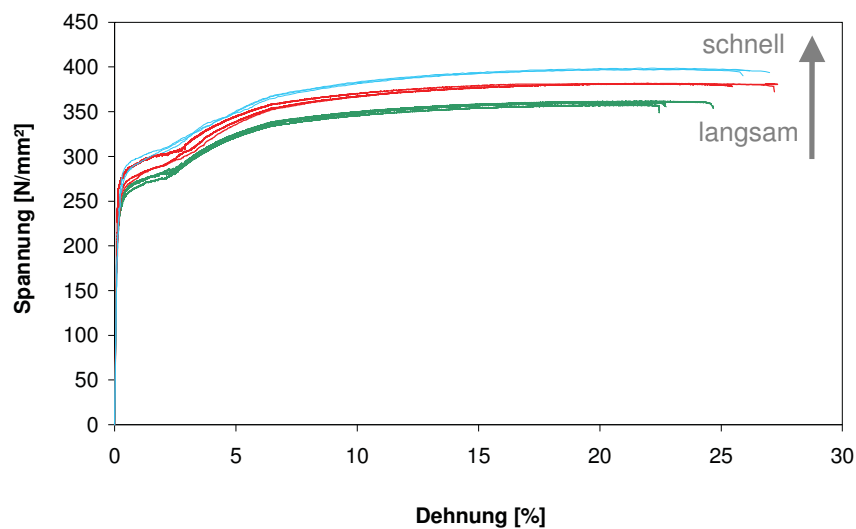


Abbildung 3.3: Spannungs-Dehnungs-Linie der Mikrobewehrung (abhängig von der Belastungsgeschwindigkeit)

Die maßgebenden Messwerte sind in Tabelle 3.1 zusammengestellt.

Tabelle 3.1: Werkstoffkennwerte der Mikrobewehrung (S235)

Streckgrenze [N/mm ²]	247 – 281
Dehnung zu Beginn der Verfestigung [%]	2,1 – 2,6
Zugfestigkeit [N/mm ²]	358 – 399
Dehnung unter Höchstlast [%]	21,0 – 22,7
Bruchspannung [N/mm ²]	355 – 395
Bruchdehnung [%]	22,2 – 27,2

3.3 Verbundverhalten Mikrobewehrung/UHPC

3.3.1 Allgemeines und Versuchsaufbau

Die Grundlage des mikrobewehrten Ultrahochleistungsbetons bildet das Zusammenwirken beider Materialien. Die Kraftübertragung bestimmt Rissbildung, Rissbreiten und Verformungsverhalten des Verbundwerkstoffs.

Zur Klärung des Verbundverhaltens kann aufgrund der geometrischen Abmessungen nicht wie für gerippten Betonstahl auf übliche Ausziehversuche nach RILEM [RIL83] zurückgegriffen werden. Infolge des geringen Durchmessers der Mikrobewehrung von 1,0 bis 2,0 mm wird daher ein modifizierter Versuchsaufbau verwendet (Abbildung 3.4). Die Verformungsmessungen werden dabei analog zu den Untersuchungen an der Mikrobewehrung (Kapitel 3.2) mithilfe eines optischen Verfahrens durchgeführt.

Die UHPC-Proben weisen eine Länge von 400 mm, Breite von 40 mm und Dicke von 15 mm auf. Die Länge von 400 mm ist erforderlich, um die UHPC-Probe sicher in die Prüfmaschine einspannen zu können. Im Abstand von 11 mm vom oberen Rand des Probekörpers ist eine Aussparung angeordnet. Ein Ausschnitt aus einer Mikrobewehrungsmatte, bestehend aus einem Längsdraht und mehreren Querdrähten wird ideal zentrisch innerhalb der Probe derart eingebaut, dass ein Querdraht im Abstand von 5 mm vom oberen Rand im Verbund liegt. Ein Ende des Mikrobewehrungsmattenausschnitts befindet sich innerhalb der Aussparung und ist zur Aufzeichnung der Verschiebung mit einem Reflexionspunkt ausgestattet, das andere Ende wird in die Zugmaschine eingespannt. Der zweite Reflexionspunkt zur Ermittlung des Ausziehwegs wird auf dem Betonsteg angeordnet. Während des Versuchs wird neben der Zugkraft die Wegdifferenz der beiden Reflexionspunkte aufgezeichnet. Die Zuggeschwindigkeit beträgt konstant 0,1/min.

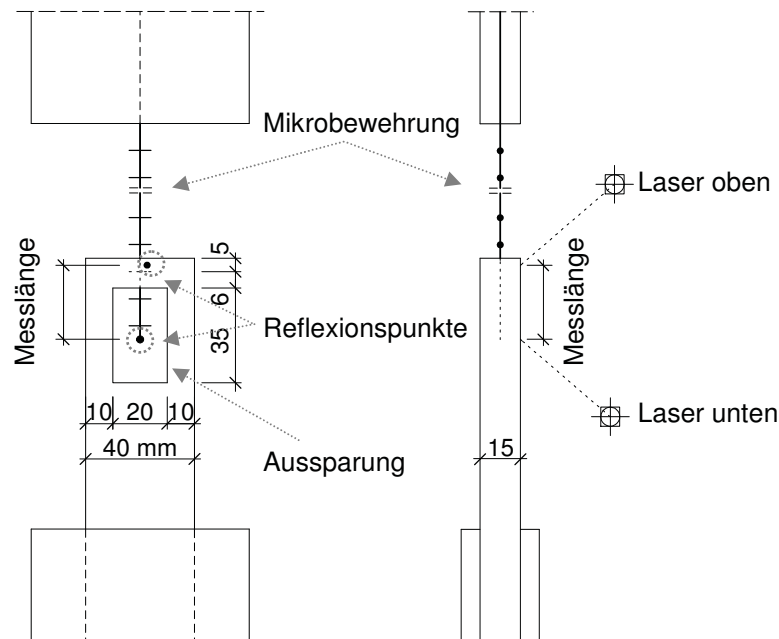


Abbildung 3.4: Versuchsaufbau der Verbundversuche, links: Frontansicht, rechts: Seitenansicht

Zusätzlich wird das Verbundverhalten der nackten Drähte ohne Querdrähte untersucht. Der zugehörige Versuchsaufbau entspricht dabei jedoch eher dem, der bei Faserverbundversuchen zum Einsatz kommt (Abbildung 3.5).

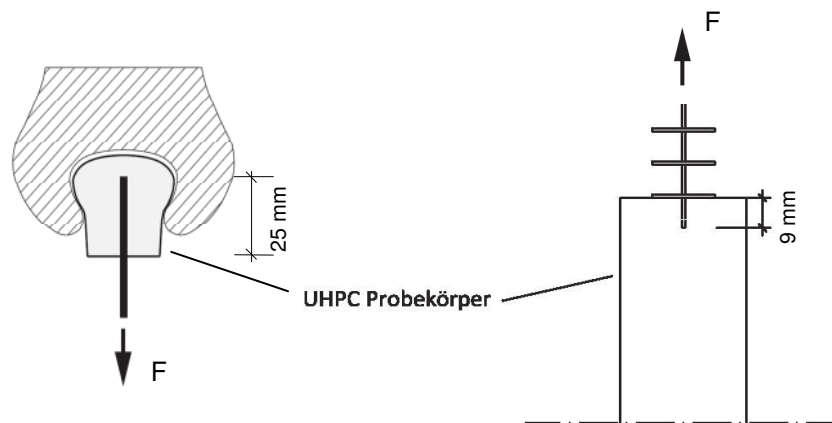


Abbildung 3.5: Schematischer Versuchsaufbau der Verbundversuche für a) Fasern [Li94] und b) Mikrobewehrung ohne Querdrähte

Die Einbindelänge beträgt bei allen Proben 9 mm. Neben der Zugkraft F wird über die gesamte Versuchsdauer der Weg der Faser bzw. der Mikrobewehrung am freien Ende gemessen. Die Relativverschiebung zwischen Mikrobewehrungsdraht und UHPC wird nicht erfasst. Die Wegänderung wird wie bei der Variante mit Querdrähten ebenfalls mittels Laser und Reflexionspunkten erfasst.

3.3.2 Ergebnisse

Mikrobewehrung mit Querdrähten

In Abbildung 3.6 ist die gemessene Zugkraft über die Laufzeit des Versuchs aufgetragen. Der Verlauf der Zugkraft entspricht qualitativ dem Verlauf, der im Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Mikrobewehrung aufgetragen ist (Abbildung 3.3). Eine Darstellung der Kraft über die Verschiebung bzw. Verbundspannung über den Schlupf (τ - s -Beziehung), wie im Stahlbetonbau üblich, ist nicht möglich, da sich der Abstand beider Reflexionspunkte quasi nicht ändert. Dass sich der Mikrobewehrungsdraht am unbelasteten Ende nicht verschiebt bedeutet, dass ein starrer Verbund zwischen Mikrobewehrung und UHPC herrscht. Begründet wird der gute Verbund durch den einen Querdraht, der innerhalb des Betonstegs angeordnet ist. Dieser Draht quer zur Zugrichtung hindert den Draht am unbelasteten Ende an einer Verformung. Das Versagen tritt durch Reißen der Mikrobewehrung ein.

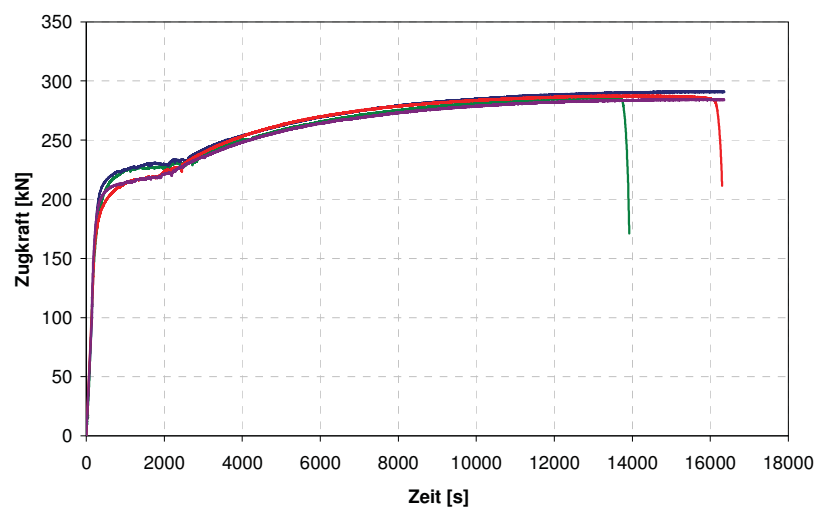


Abbildung 3.6: Zugkraft über die Versuchsdauer

Für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Zug- und Biegezugversuche bedeutet diese Verbundeigenschaft, dass ein Versagen durch Auszug der Mikrobewehrung, wie es bei faserbewehrtem Beton die Regel ist, ausgeschlossen werden kann. Die unverschieblichen Querdrähte agieren als Widerhaken. Das Versagen wird daher in der Regel durch das Erreichen der Zugfestigkeit der Mikrobewehrung bestimmt. Dieser gute Verbund zwischen Mikrobewehrung und UHPC-Matrix führt zu geringen Rissabständen mit einhergehenden geringen Rissbreiten [vgl. Kapitel 3.6.4].

Mikrobewehrung ohne Querdrähte

Der Vollständigkeit halber ist auch das Verbundverhalten der "nackten Drähte" in Abbildung 3.7 angegeben. Nach einem nahezu linearen Anstieg der Zugkraft über den gemessenen Weg endet mit Erreichen der Maximalkraft der Haftverbund. Der daran anschließende Reibungsverbund endet mit dem Auszug des Längsbewehrungsdrahtes. Die Kraft-Weg-Beziehung des glatten Drahtes erinnert vom Verlauf her an die typischen Verbundspannungs-Schlupf-Beziehungen von Verbundversuchen an Einzeldrahtfasern mit geraden Enden in Beton (Normalbeton, HPC und UHPC) [Li94; Bor04; Beh96].

Alle weiteren Versuche und Berechnungen in der vorliegenden Arbeit gehen von einer Maschenstruktur der Mikrobewehrung aus, da Querdrähte stets vorhanden sind.

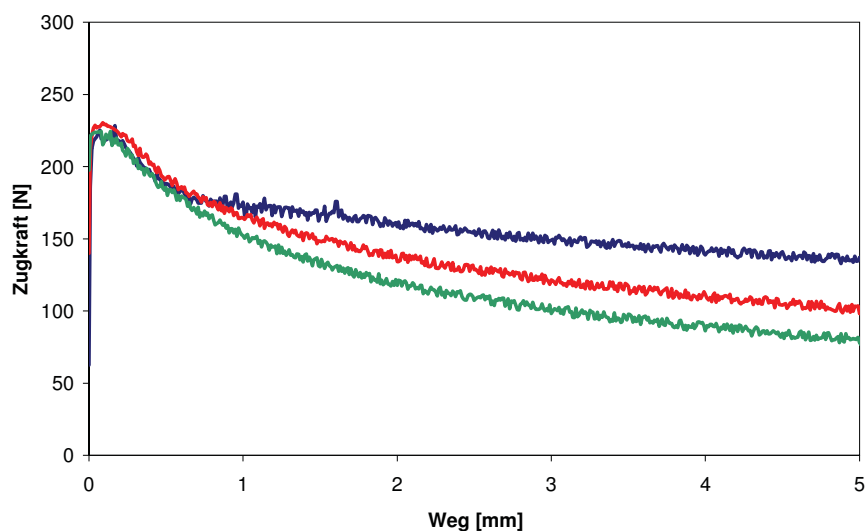


Abbildung 3.7: Geglättete Kraft-Weg-Beziehung

3.4 Druckfestigkeit und statischer E-Modul von UHPC

3.4.1 Allgemeines

Druckfestigkeit und Spannungs-Dehnungs-Beziehung

Zur Ermittlung der maximalen einaxialen Druckfestigkeit werden experimentelle Untersuchungen nach DIN EN 12390-3 [DIN12390-3] an Würfeln und Zylindern durchgeführt. Hierbei ist aufgrund der hohen einwirkenden Kräfte besonders darauf zu achten, dass die Prüfflächen parallel und absolut eben sind, da es ansonsten durch Exzentrizitäten zum frühen Abscheren der Bruchflächen und damit zu verfälschten Messergebnissen kommt. Alle im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersuchten Zylinder werden daher 24 Stunden vor Versuchsbeginn planparallel geschliffen. Um Einflüsse aus der Oberflächenfeuchte auf die Prüfergebnisse zu minimieren, werden alle Proben 24 Stunden vor Prüfbeginn aus der Wasserlagerung entnommen.

In allen Druckversuchen wird die Last über zwei starre Lasteinleitungsplatten eingeleitet. Damit ist ein eventuell vorhandener Einfluss einer behinderten Querdehnung auf die Festigkeit für alle Probekörper gleichermaßen vorhanden.

Die Ermittlung der maximalen Spannung erfolgt über eine konstante Spannungszunahmegeschwindigkeit von $0,5 \text{ N/mm}^2\text{s}$. Diese Art der Maschinensteuerung lässt jedoch eine Aufzeichnung des Nachbruchbereichs nicht zu – nach Erreichen der maximalen Spannung kommt es zum Versagen der Probe. Um eine Spannungs-Dehnungs-Beziehung für den Druckbereich zu erhalten, werden daher zusätzlich weggesteuerte Versuche durchgeführt. Der Kolbenweg der Versuchseinrichtung beträgt dabei konstant $0,003 \text{ mm/s}$. Bei beiden Versuchsvarianten wird über die eingeleitete Kraft die Spannung über die entsprechende Probengeometrie errechnet. Die Dehnungen werden in den weggesteuerten Versuchen mittels Dehnungsmessstreifen und zusätzlich zwischen den Lasteinleitungsplatten angeordneten induktiven Wegaufnehmern aufgenommen. Die Dehnungszunahme liegt bei beiden Versuchssteuerungsarten (kraft- und weggeregelt) zumindest im elastischen Bereich in gleicher Größenordnung (im Bereich $1,1 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$). Die maximalen Spannungen, die von der Belastungsgeschwindigkeit abhängen sind daher vergleichbar.

Elastizitätsmodul

Der statische Elastizitätsmodul wird aufgrund fehlender internationaler Regelungen versuchstechnisch nach DIN 1048-5 [DIN1048] ermittelt. Die Spannungszu- und abnahmegeschwindigkeit zwischen der Unter- (8,8 kN) und Oberlast ($1/3 \cdot f_c$) beträgt genau wie in den Versuchen zur Ermittlung der maximalen Druckfestigkeit 0,5 N/mm²s.

3.4.2 Unbewehrter UHPC**Druckfestigkeit**

Die Druckfestigkeit unbewehrter Proben wird zunächst an Normzylindern mit einer Probekörpergeometrie (Ø 150, h 300 mm) gemäß DIN EN 12390-1 [DIN12390-1] ermittelt. Um die Druckfestigkeitsentwicklung über das Alter der Probekörper zu erhalten, erfolgen die Prüfungen nach 3, 7 und 28 Tagen. Vergleichend werden neben den Zylinder- auch die Würfeldruckfestigkeiten im gleichen Alter geprüft (Tabelle 3.2). Hierbei fällt auf, dass anders als bei normalfestem und hochfestem Beton, zumindest für die im Rahmen dieser Arbeit geprüften Geometrien, keine nennenswerten Unterschiede in der aufnehmbaren Maximalspannung bestehen. Es existieren bereits erste Ansätze [JuMu04, Ma10], die den abnehmenden Einfluss der Probekörperform für steigende Druckfestigkeiten belegen. Zum genauen Einfluss der Probekörperform auf die Druckfestigkeit von UHPC besteht jedoch noch Forschungsbedarf.

Tabelle 3.2: Zylinder- und Würfeldruckfestigkeit der Mischung M1 im Alter von 3, 7 und 28 Tagen bei Wasserlagerung (20 °C)

Probekörpergeometrie	Alter [d]	Druckspannung f_{cm} [N/mm ²]
Zylinder (Ø150, h 300)	3	97,8
	7	121,0
	28	144,7
Würfel (100er)	3	100,2
	7	118,0
	28	143,2

Der Einfluss einer Wärmebehandlung (bei 90 °C für 48 Stunden, vgl. Kapitel 2.3.2) auf die Druckfestigkeit wird ebenfalls an Normzylindern untersucht. Hierbei kann jedoch, bedingt durch die Wärmebehandlung, die Festigkeit frühestens im Alter von 5 Tagen ermittelt werden. Mit 179,5 N/mm² im Mittel (Tabelle 3.3) liegt die Festigkeit bereits nach fünf Tagen allein durch die Wärmebehandlung über der Festigkeit, die ohne Wärmebehandlung im Alter von 28 Tagen erreicht wird. Am siebten Tag ist es versuchsanlagentechnisch nicht mehr möglich, die Proben zu zerstören. Es lässt sich jedoch folgende Aussage treffen: Die Festigkeit, die ab einem Alter von sieben Tagen erreicht wird, liegt über 193,0 N/mm². Da im weiteren Verlauf dieser Arbeit aus Gründen der Nachhaltigkeit und unter Berücksichtigung der praktischen Anwendbarkeit ohnehin auf eine Wärmebehandlung verzichtet wird, sind die tatsächlich erreichbaren Festigkeiten durch eine Wärmebehandlung an dieser Stelle von untergeordnetem Interesse, der Vollständigkeit halber dennoch aufgeführt.

Tabelle 3.3: Zylinderdruckfestigkeit der Mischung M1 im Alter von 5, 7 und 28 Tagen bei Wärmebehandlung (90 °C)

Probekörpergeometrie	Alter [d]	Druckspannung f_{cm} [N/mm ²]
Zylinder (Ø150, h 300)	5	179,5
	7	> 193,0
	28	> 193,0

Spannungs-Dehnungs-Beziehung

Die Spannungs-Dehnungs-Beziehung des unbewehrten UHPC, die aus den weggeregelten Versuchen resultiert, ist in Abbildung 3.8 dargestellt. Bis zu einer Last von ca. 75 % der maximalen Last wird ein linear-elastisches Materialverhalten aufgezeichnet. Von diesem Punkt an nehmen die Dehnungen überproportional zu und mit Erreichen der maximalen Spannung kommt es zu einem explosions- bzw. schlagartigen Versagen des UHPC (Abbildung 3.14, rechts). Eine Aufzeichnung des Nachbruchbereichs ist trotz der geringen Belastungsgeschwindigkeit aufgrund der Sprödigkeit nicht möglich. Die zur maximalen Spannung zugehörige Stauchung der unbewehrten Proben beträgt zwischen 2,7 und 3,3 ‰.

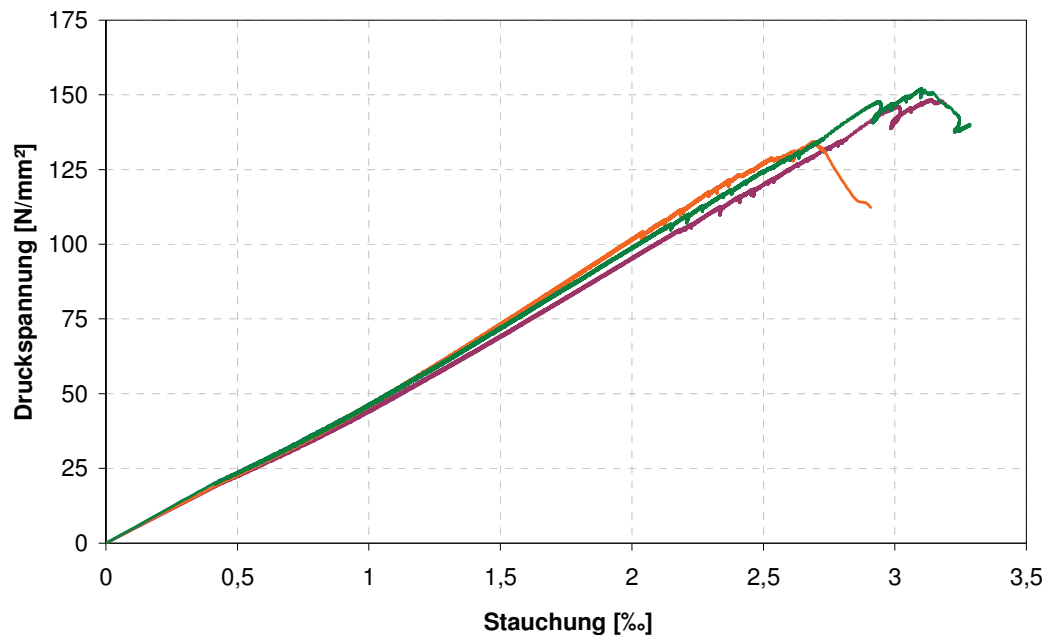


Abbildung 3.8: Spannungs-Dehnungs-Beziehung des unbewehrten UHPC (Zylinder Ø 150, h 300)

Elastizitätsmodul

Der separat an Normzylindern ermittelte E-Modul beträgt für unbewehrte Proben bei Wasserlagerung (20 °C) 48.867 N/mm² (Mittelwert). Die Einzelwerte sind Tabelle A 3.2 (Anhang A3) zu entnehmen.

3.4.3 Faserbewehrter UHPC

Druckfestigkeit

Die Mischung M1-F enthält einen Fasergehalt von 2,4 Vol.-%. Die maximale Druckfestigkeit wird an Zylindern (Ø 150, h 300 mm) zu den Zeitpunkten 3, 7 und 28 Tagen untersucht. Die Ergebnisse der Prüfungen sind in Tabelle 3.4 aufgeführt. Neben dem unterschiedlichen Alter wird auch der Einfluss einer Wärmebehandlung auf die Festigkeit faserbewehrter Proben untersucht.

Tabelle 3.4: Zylinderdruckfestigkeit der Mischung M1-F im Alter von 3 bzw. 5, 7 und 28 Tagen bei unterschiedlicher Lagerung

Probekörper- geometrie	Lagerung	Alter [d]	Druckspannung f_{cm} [N/mm ²]
Zylinder (Ø150, h 300)	Wasser 20 °C	3	136,2
		7	158,9
		28	181,3
Zylinder (Ø150, h 300)	Wärme 90 °C	5	185,5
		7	> 193,0
		28	> 193,0

Wie bereits für unbewehrte UHPC-Proben festgestellt wurde, übersteigt auch für faserbewehrte UHPC-Proben die Festigkeit unmittelbar nach der Wärmebehandlung (5 Tage nach der Herstellung) die 28-Tage-Festigkeit der Proben ohne Wärmebehandlung. Allerdings ist die Differenz deutlich geringer als bei unbewehrten Proben.

Spannungs-Dehnungs-Beziehung

Anders als bei unbewehrtem UHPC kann der Nachbruchbereich im Druckversuch aufgezeichnet werden. Durch die Faserzugabe wird der Versagensprozess direkt beeinflusst. Das „Nadelgerüst“ gewährleistet, dass die Probekörperform zunächst auch nach Erreichen der Maximallast erhalten bleibt (Abbildung 3.14). Nach verstärkter Längsrissbildung fällt die aufnehmbare Kraft unter stark anwachsender Stauchung der Probe ab. Während bis zum Erreichen der Höchstlast die Abweichungen zwischen den Spannungs-Dehnungs-Linien der gleichaltrigen Probekörper gering waren, variieren diese im Entfestigungsverhalten stark. Infolge zunehmender Rissbildung ist keine sichere Aufzeichnung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung für Stauchungen oberhalb 5 ‰ möglich, da die Dehnungsmessstreifen versagen und auch zusätzliche Messelemente wie induktive Wegaufnehmer (zur Messung des Abstandes zwischen den Lasteinleitungsplatten) durch Absprengungen feiner Betonsplitter der Probekörper ausfallen.

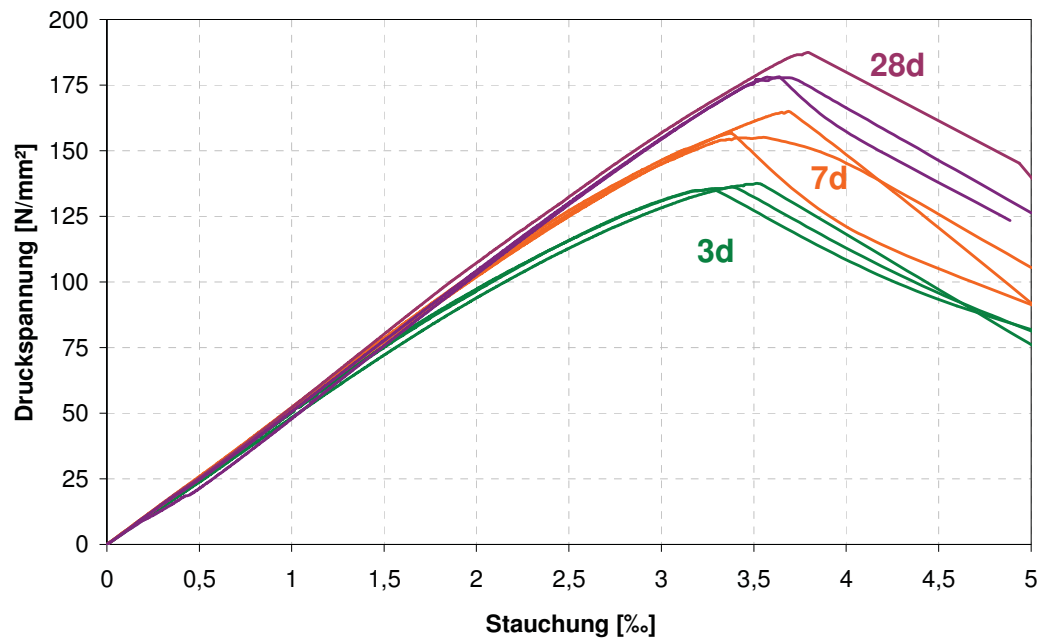


Abbildung 3.9: Spannungs-Dehnungs-Beziehung des faserbewehrten UHPC (Zylinder Ø 150, h 300) im Alter von 3, 7 und 28 Tagen

Gemäß den durchgeführten Untersuchungen (Abbildung 3.9) ist das Materialverhalten des faserbewehrten UHPC nach 28 Tagen im Druckversuch bis zu einer Spannung von 80 % der Maximalspannung linear-elastisch. Die Dehnung bei Erreichen der Höchstlast beträgt nach 28 Tagen um 3,7 ‰.

Elastizitätsmodul

Der E-Modul der faserbewehrten Proben liegt gemäß den durchgeführten Normversuchen zwischen 55.424 und 57.903 N/mm² (Tabelle A 3.2, Anhang A3). Anhand der Spannungs-Dehnungs-Beziehung (Abbildung 3.9) kann nach 28 Tagen ein E-Modul von 52.000 – 54.000 N/mm² abgelesen werden.

3.4.4 Mikrobewehrter UHPC

Druckfestigkeit

Alle Untersuchungen zur Druckfestigkeit werden aus Gründen der Vergleichbarkeit zu unbewehrtem und faserbewehrtem UHPC ebenfalls an Normzylindern (\varnothing 150 mm, h 300 mm) durchgeführt. Die Mikrobewehrung wird in einzelnen Scheiben mit einem Durchmesser von 145 mm in die Zylinder eingelegt. Der Stahlgehalt soll wie bei faserbewehrten Proben 2,4 Vol.-% betragen, was einem Einbau von 56 einzelnen Mikrobewehrungsscheiben entspricht. Diese Scheiben werden gleichmäßig über die Höhe des Zylinders verteilt (Abbildung 3.10, links). Um einen gleichmäßigen Abstand der Mikrobewehrungsscheiben untereinander zu gewährleisten, werden entsprechend dünne UHPC-Plättchen (Alter: 1 d, Abbildung 3.10, rechts) als Abstandhalter zwischen den Mikrobewehrungsscheiben positioniert. Insgesamt ist der Herstellprozess der mikrobewehrten Versuchskörper mit einem relativ hohen Aufwand verbunden. Aufgrund dieser Tatsache werden zu den neun Zylindern mit Wasserlagerung (Prüfung nach 3, 7 und 28 Tagen) nur drei Probekörper hergestellt, die einer Wärmebehandlung ausgesetzt werden. Die Prüfung dieser Proben mit Wärmebehandlung erfolgt nach 28 Tagen.

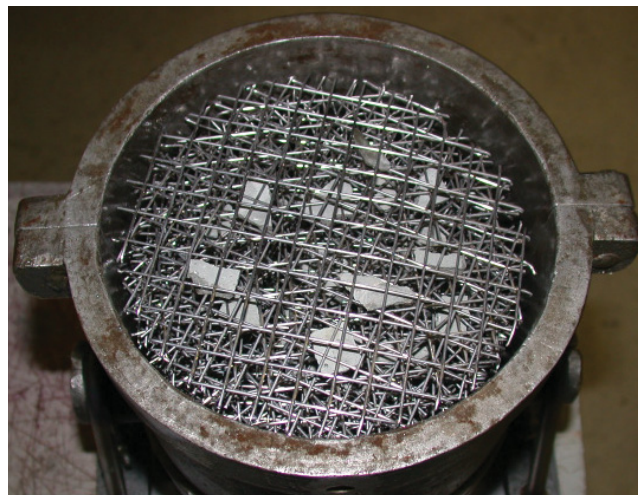
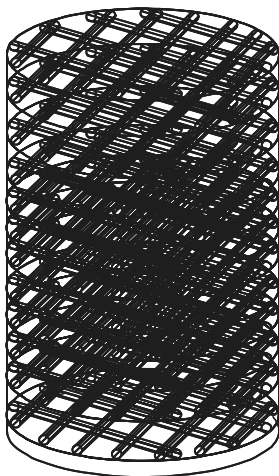


Abbildung 3.10: Schematische Darstellung der Mikrobewehrungsanordnung und Darstellung der eingebauten Abstandhalter (rechts)

Für diese in Abbildung 3.10 angegebene Anordnung der Mikrobewehrung ergeben sich die in Tabelle 3.5 zusammengestellten Druckfestigkeiten.

Tabelle 3.5: Zylinderdruckfestigkeit M1-MB (3d, 7d und 28d Wasserlagerung, 28d mit Wärmebehandlung)

Probekörper- geometrie	Lagerung	Alter [d]	Druckspannung f_{cm} [N/mm ²]
Zylinder (Ø150, h 300)	Wasser 20 °C	3	138,9
		7	162,6
		28	> 192,0
Zylinder (Ø150, h 300)	Wärme 90 °C	28	> 193,0

Es sei darauf hingewiesen, dass sich die gemäß Abbildung 3.10 dargestellte Anordnung der Mikrobewehrung als günstigste Variante herausgestellt hat. Voruntersuchungen, in denen die Mikrobewehrung als gerollte Matte in die Zylinder eingestellt wurde (Abbildung 3.11), was mit einem erheblich geringerem Herstellaufwand verbunden ist, führten zu einem Ausknicken der Mikrobewehrungsdrähte in Verbindung mit einer geringeren Tragfähigkeit. Des Weiteren kam es bei diesen Proben zu einem Absprengen der Betondeckung. Der Umstand, dass die vertikalen Drähte in Druckrichtung eher zu einer Schwächung als einer Verstärkung führen, wurde für Ferrocement u. a. bereits 1974 und 1986 gezeigt [PaSL74, KaKa86].

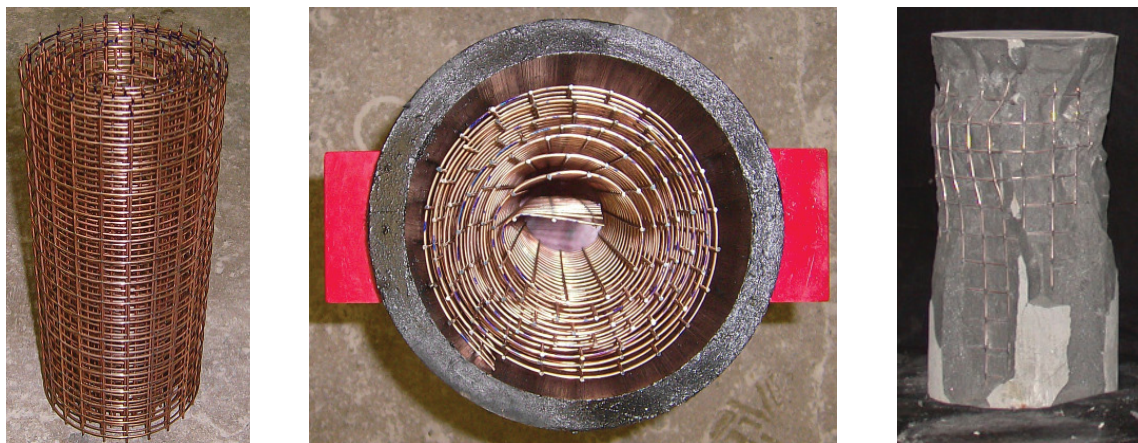


Abbildung 3.11: Herstellung der Proben mit vertikaler Anordnung der Mikrobewehrung (links und Mitte) und Probe nach dem Druckversuch (rechts)

Spannungs-Dehnungs-Beziehung

Ähnlich wie die faserbewehrten UHPC-Proben sind die mikrobewehrten Proben auch nach dem Druckversuch weitestgehend intakt (Abbildung 3.14). Durch die Mikrobewehrung wird, wie durch die Fasern, das Gefüge zusammengehalten. Die Spannungs-Dehnungs-Linie zeigt, dass der Kraftabfall nach Erreichen der Höchstlast aufgezeichnet werden kann und durch den Einbau einer Mikrobewehrung das Ziel eines duktileren Verhaltens erreicht wird (Abbildung 3.12). Ebenso wie bei den Proben mit Fasern sind sichere Angaben über das Verhalten im Nachbruchbereich aufgrund sehr großer Streuungen nicht möglich und daher lediglich Verformungen bis 5 ‰ aufgetragen. Die Stauchung unter maximaler Beanspruchung liegt im Bereich von 3,7 bis 4,1 ‰.

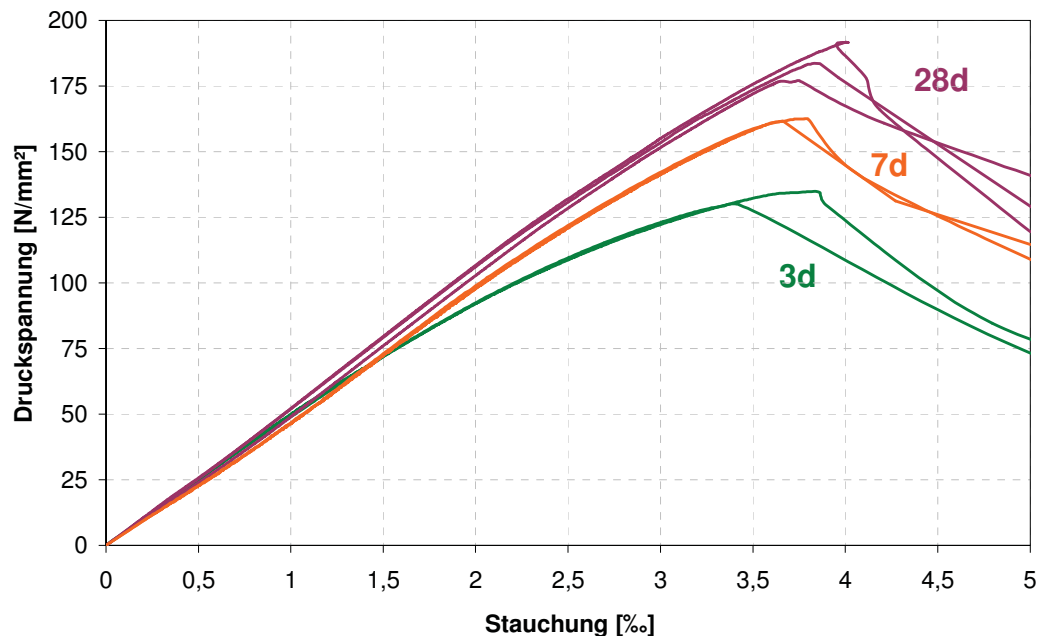


Abbildung 3.12: Spannungs-Dehnungs-Beziehung des mikrobewehrten UHPC (Zylinder Ø 150, h 300) im Alter von 3, 7 und 28 Tagen

Elastizitätsmodul

In Normversuchen wird ein E-Modul von 54.944 N/mm² (Tabelle A 3.2, Anhang A3) mit auffällig geringer Streuung ermittelt (Standardabweichung 162 N/mm²). Aus der Spannungs-Dehnungs-Beziehung (Abbildung 3.12) wird ein E-Modul um 52.500 N/mm² abgeleitet.

3.4.5 Fazit

Druckfestigkeit

Bei der Gegenüberstellung der Ergebnisse der Druckversuche (Tabelle 3.2, Tabelle 3.4 und Tabelle 3.5 sowie Abbildung 3.13) zeigt sich, dass eine Zugabe von Fasern, hingegen der in der Fachwelt teilweise vertretenen Meinung [Falk97, NeFe05], einen erheblichen Einfluss auf die Festigkeit sowie den E-Modul von Beton hat. Auch durch Einbau einer Mikrobewehrung werden Festigkeit und E-Modul beeinflusst. Die Erhöhung der Druckfestigkeit durch die Mikrobewehrung im Vergleich zu unbewehrten Proben im Alter von 28 Tagen liegt bei mindestens 33 %. Für eine Faserbewehrung beträgt die Steigerung ca. 25 %.

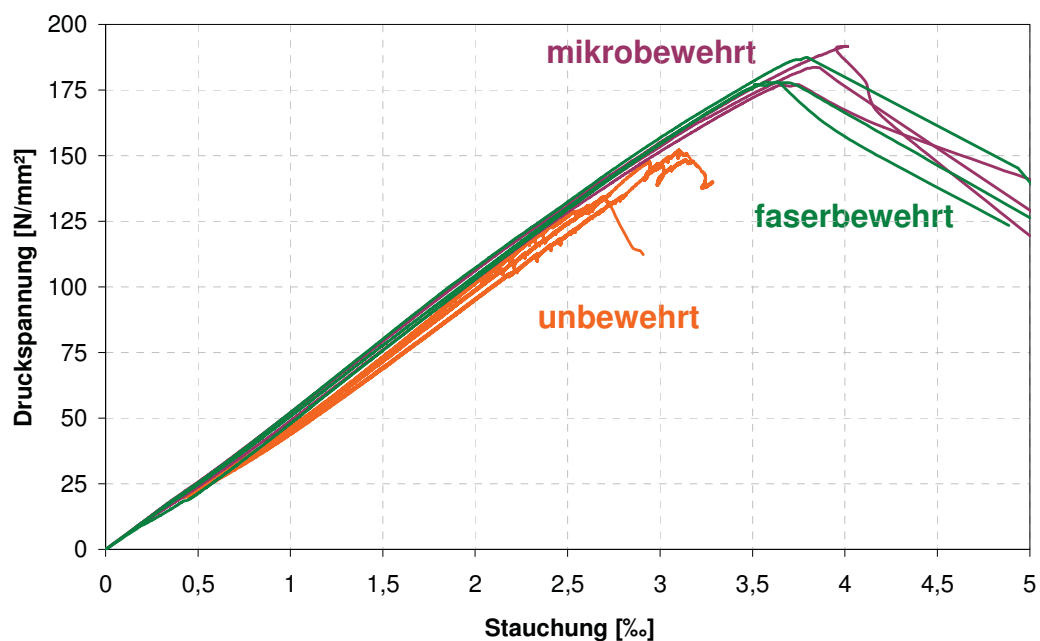


Abbildung 3.13: Spannungs-Dehnungs-Beziehung für mikro-, faser- und unbewehrten UHPC (28d)

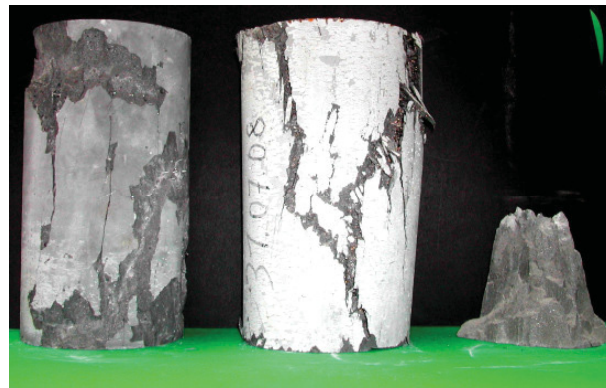


Abbildung 3.14: Probekörper nach den Druckversuchen (mikro-, faser-, unbewehrt, v. l. n. r.)

Versagen

Während unbewehrte Proben schlagartig versagen, wird durch Zugabe von Fasern oder Mikrobewehrung, wie gewünscht, ein Versagen mit Vorankündigung erzeugt. Für eine Definition des Begriffs "duktil" anhand Abbildung 3.15 („Kraftübertragung auch nach dem Aufbringen großer Verformungen“ [CuSp02]), kann weder bei faser- noch bei mikrobewehrtem UHPC von einem „duktilen“ Verbundwerkstoff gesprochen werden. Das Versagen wird zwar durch verstärkte Mikrorissbildung angekündigt und die Geometrie der Proben bleibt weitestgehend auch nach Versuchsdurchführung erhalten (Abbildung 3.14). In Anlehnung an [CuSp02] wird das Materialverhalten unter einer Druckbeanspruchung jedoch eher als „spröde-duktil“ bezeichnet (Abbildung 3.15).

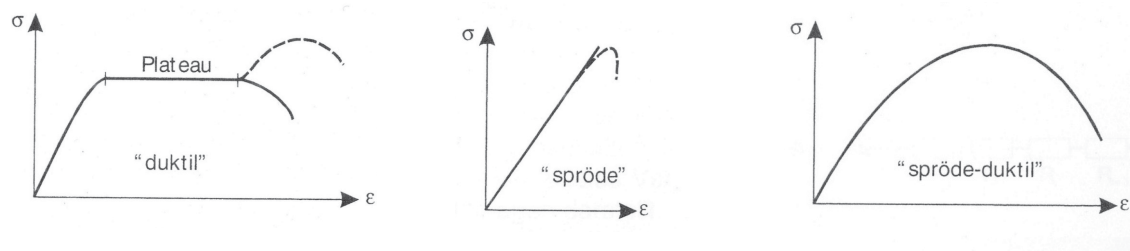


Abbildung 3.15: Definition unterschiedlich duktiler Materialien anhand derer Arbeitslinien [CuSp02]

Wärmebehandlung

Bezüglich des Einflusses einer Wärmebehandlung stellt sich heraus, dass die Wärmebehandlung von Ultrahochleistungsbeton generell in einer signifikanten Steigerung der maximalen Drucktragfähigkeit resultiert. Dieser Effekt ist bei unbewehrten Proben jedoch stärker ausgeprägt, als bei bewehrten Proben. Während unbewehrte Proben nach drei Tagen und einer Standardlagerung (20 °C, Wasser) Festigkeiten von im Mittel 97,8 N/mm² erreichen, ist die Festigkeit nach einer Wärmebehandlung am fünften Tag bereits um 83 % höher. Faserbewehrte Proben zeigen hingegen „nur“ eine Steigerung von 36 %. Begründet wird der geringere Anstieg mit der ohnehin gesteigerten Druckfestigkeit und Steifigkeit durch die Bewehrung.

Elastizitätsmodul

Hinsichtlich des Elastizitätsmoduls besteht zwischen faser- und mikrobewehrtem UHPC kein nennenswerter Unterschied. Gegenüber unbewehrten Proben ist eine Steigerung des E-Moduls durch Zugabe einer Mikrobewehrung in der Größenordnung von 2,4 Vol.-% um 12 % möglich. Durch die Verwendung von Mikrodrahtfasern (2,4 Vol.-%), kann eine Erhöhung um ca. 16 % erreicht werden.

Ein Vergleich zwischen faser- und mikrobewehrtem UHPC zeigt, dass bei günstiger Ausrichtung der Mikrobewehrung die Fasern ersetzt werden können, ohne das Materialverhalten unter einer Druckbeanspruchung negativ zu beeinflussen. An dieser Stelle muss jedoch erwähnt werden, dass der Einbau der Mikrobewehrung in die Zylinder aufgrund der ungünstigen geometrischen Abmessungen unter Einhaltung eines Stahlgehaltes von 2,4 Vol.-% mit einem deutlich erhöhten Mehraufwand während der Herstellung verbunden ist.

3.5 Zentrische Zugfestigkeit von UHPC und Nachrissverhalten

3.5.1 Allgemeines

Die zentrische Zugfestigkeit von unbewehrtem, faser- und mikrobewehrtem UHPC wird an prismatischen Probekörpern (160 mm x 40 mm x 40 mm) ermittelt. Nachdem in Vorversuchen festgestellt wurde, dass sowohl eine Kerbung an zwei gegenüberliegenden Seiten als auch eine Schwächung über den gesamten Umfang zu stark streuenden und aufgrund hoher Kerbspannungen vor allem vergleichsweise geringen Zugfestigkeiten führt, werden die im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersuchten Proben nicht gekerbt.

Die Versuchsvorbereitung verläuft bei allen in Kapitel 3.5 vorgestellten Proben identisch. Um die Prismen in die Prüfmaschine einbauen zu können, werden zunächst auf die Stirnseiten der Proben die Prüfstempel geklebt. Da die geschalteten Stirnseiten der Proben eine relativ glatte Oberfläche besitzen, ist ein Sandstrahlen zum Aufräumen der Oberfläche erforderlich. Im Anschluss daran werden die Prüfstempel mittels Epoxidharz mit den Prismen verklebt. Nach der Aushärtezeit des Klebers (min. 16 Stunden) erfolgt die Zugprüfung. Um die Prismen zuverlässig mit den Prüfstempeln zu verbinden, müssen sie eine trockene Oberfläche aufweisen. Auch die Applikation der Messelemente (Dehnungsmessstreifen, bzw. induktive Wegaufnehmer) erfordert eine abgetrocknete Oberfläche. Das heißt, dass alle Prismen zum Zeitpunkt der Prüfung bereits drei Tage an der Luft lagerten. Einflüsse aus unterschiedlicher Austrocknung der Proben untereinander bestehen damit nicht.

Hinsichtlich des Einbaus in die Prüfmaschine wurden in Vorversuchen drei unterschiedliche Varianten getestet (Abbildung 3.16).

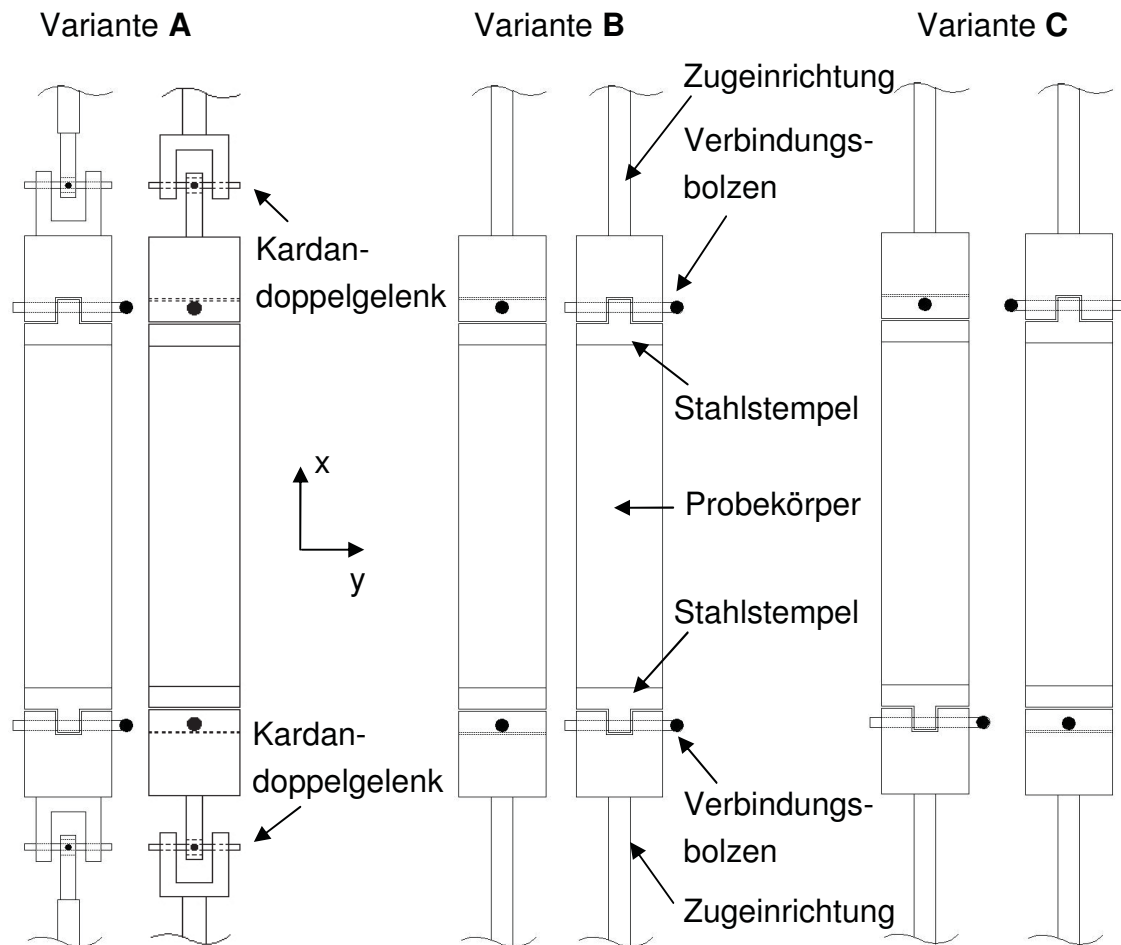


Abbildung 3.16: Schematische Darstellung (jeweils 2 Seitenansichten) unterschiedlicher Lagerungsarten im zentrischen Zugversuch

Alle drei Varianten lassen Verformungen in Richtung der Probekörperlängsachse (x-Richtung) zu. Während die Varianten A und B doppelgelenkige bzw. einfachgelenkige Lagerungen bieten, stellt Variante C eine Einspannung dar. Durch die gelenkige Lagerung sollten geometrische Imperfektionen ausgeglichen und eine zentrische Lasteinleitung gewährleistet werden. Infolge der Streuung der Festigkeit über den Querschnitt der Proben setzte der Rissbildungsprozess an einer Querschnittsseite ein. Für die gelenkig gelagerten Prismen bedeutete dies ein reißverschlussartiges Aufreißen über den Probenquerschnitt (Abbildung 3.17). Aus diesem Grund wurden die Ergebnisse der nachfolgend aufgeführten Versuche an eingespannten Prismen (Variante C) ermittelt.

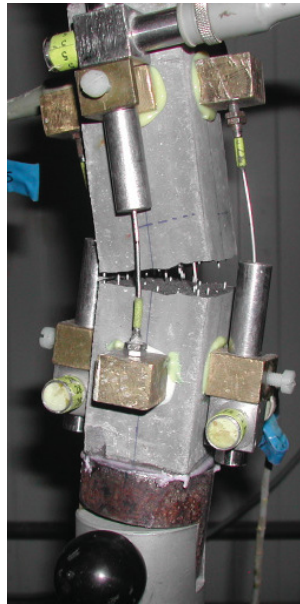


Abbildung 3.17 Reißverschlussartiges Aufreißen einer gelenkig gelagerten Probe

Zur Aufzeichnung der Längsdehnung unbewehrter Prismen werden drei Dehnungsmessstreifen appliziert. Zusätzlich werden vier induktive Wegaufnehmer angeordnet. Es zeigt sich, dass die Dehnung resultierend aus der Wegänderung bezogen auf die Basislänge mit der Dehnung, die mittels Dehnungsmessstreifen ermittelt wird, nahezu identisch ist. Zusätzlich erlauben die induktiven Wegaufnehmer eine Messung der Rissöffnung, weshalb sie für alle bewehrten Prismen zum Einsatz kommen.

Alle Zugversuche werden in einer Prüfmachine des Typs Schenk Trebel RM50 (50 kN, Maximallast) weggeregelt durchgeführt. Die Verformungsgeschwindigkeit beträgt dabei konstant 0,005 mm/s.

Aufgrund der relativ großen Streuung der Versuchsergebnisse, insbesondere derer der unbewehrten Prismen wird die Zugfestigkeit jeweils an sechs Proben ermittelt.

3.5.2 Unbewehrter UHPC

Die Mittelwerte der Spannungs-Dehnungs-Beziehungen der unbewehrten Proben sind in Abbildung 3.18 dargestellt. Es zeigt sich ein praktisch linear-elastisches Materialverhalten bis zum Erreichen der maximalen Zugspannung und der Bildung eines schlagartigen querschnittsquerverendenden Risses. Eine Aufzeichnung des Nachbruchbereichs ist für

unbewehrte Proben genau wie im Druckversuch aufgrund der Sprödigkeit nicht möglich, sodass keine Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung ermittelt werden kann. Tatsächlich weist UHPC, wie Normalbeton, zwar ein Entfestigungsverhalten (Softening) auf, das jedoch durch die Kombination aus extremer Sprödigkeit und nicht ausreichender Steifigkeit der Prüfeinrichtung (zu langsame Reaktion der Maschinensteuerung) in den vorliegenden Versuchen nicht messbar ist. Aufgrund der hohen Feinheit der Mischungsbestandteile und damit verschlechterten Verzahnung kann aber davon ausgegangen werden, dass die resultierende Bruchenergie (definiert als Fläche unterhalb der Zugspannungs-Rissöffnungs-Beziehung abzüglich des elastischen Anteils der Verformung) geringer ist, als für einen Normalbeton. Untersuchungen von Ma [MaSW03] belegen, dass für Feinkorn UHPC eine Bruchenergie von 50 bis 60 N/m und eine lineare Entfestigung anzunehmen ist.

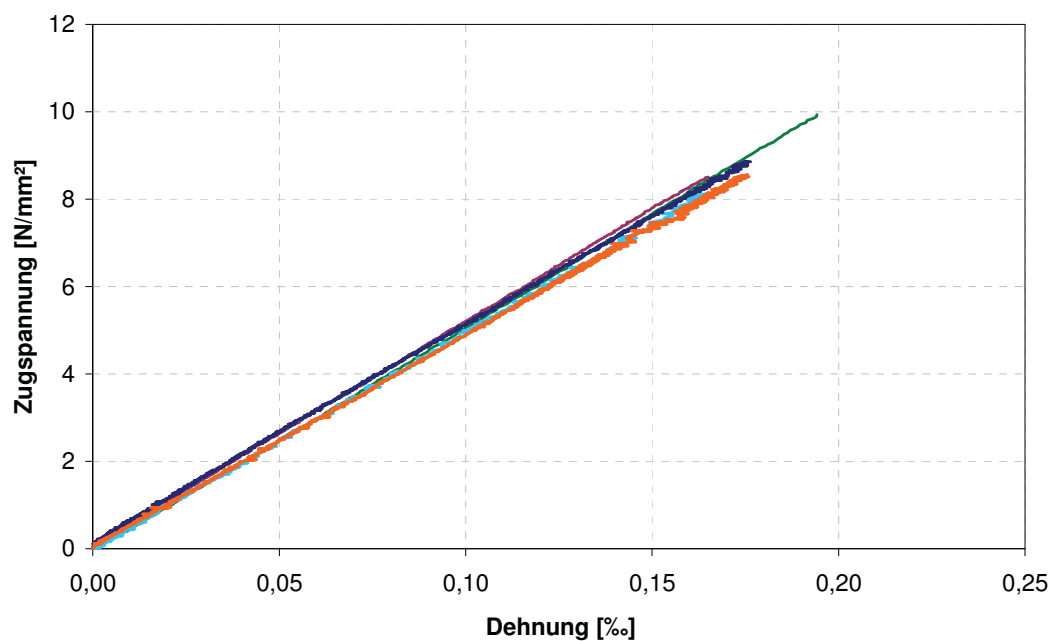


Abbildung 3.18: Spannungs-Dehnungs-Linien unbewehrter Proben (6)

Als Mittelwert ergibt sich aus sechs Proben eine Zugfestigkeit von $8,8 \text{ N/mm}^2$ mit einer relativ großen Standardabweichung von $0,6 \text{ N/mm}^2$, respektive ca. 7 %. Diese Abweichung resultiert aus einer Einzelprobe mit der Festigkeit von $9,98 \text{ N/mm}^2$. Unter der Annahme, dass es sich hierbei um einen „Ausreißer“ der Serie handelt, ergibt sich ein

Mittelwert von $8,6 \text{ N/mm}^2$ bei einer Abweichung von $0,3 \text{ N/mm}^2$. Der zugehörige E-Modul, abgelesen aus den Spannungs-Dehnungs-Linien beträgt 49.630 N/mm^2 .

3.5.3 Faserbewehrter UHPC

Auch die faserbewehrten Proben zeigen ein linear-elastisches Materialverhalten bis zum Erreichen des Spannungsmaximums (Abbildung 3.19). Mit einem Mittelwert der Zugfestigkeit von $9,9 \text{ N/mm}^2$ und einem E-Modul von 52.900 N/mm^2 bewirken die Fasern somit gegenüber den unbewehrten Proben eine Steigerung von Festigkeit und Steifigkeit. Die Standardabweichung von 8 % der Maximalspannung wird mit der streuenden Faserverteilung begründet.

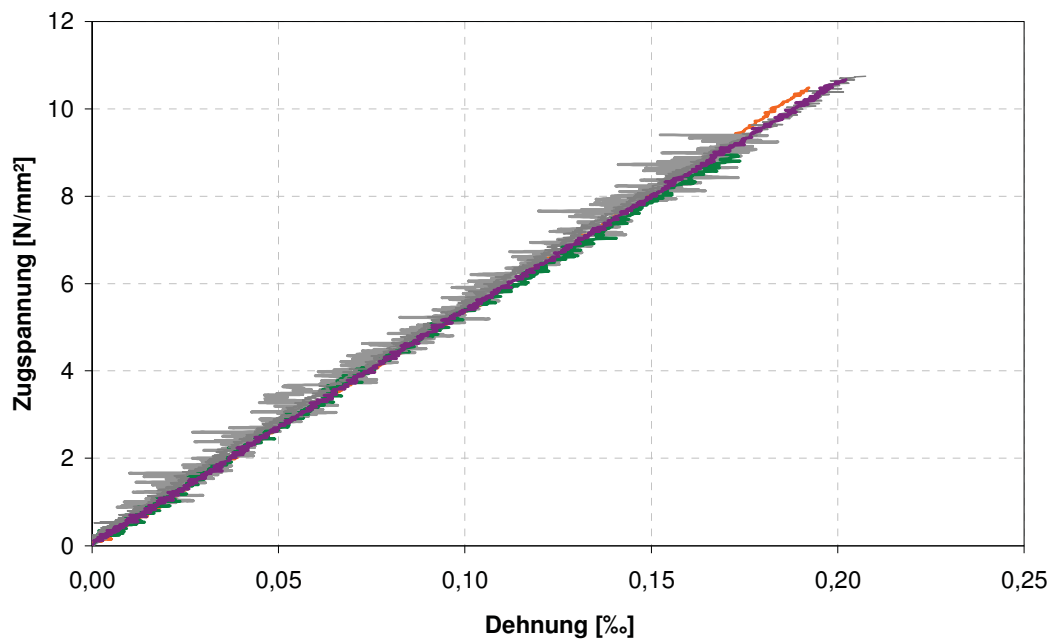


Abbildung 3.19: Spannungs-Dehnungs-Linien faserbewehrter Proben (6)

Eine verstärkte Mikrorissbildung über die Probekörperlänge, wie sie für faserbewehrten Beton (mit diesem Fasergehalt) üblicherweise zu beobachten ist [Wef10], wird im Rahmen der durchgeführten Versuche nicht festgestellt. Ein Grund hierfür liegt in einer geringfügigen Exzentrizität der Belastung. Auch der Rissbildungsprozess ist aufgrund

von zufällig verteilten Schwachstellen innerhalb des Gefüges nicht gleichmäßig über den Querschnitt verteilt. Eine resultierende Verdrehung des Probekörpers vor und nach der Bildung des Trennrisses ist den Messwerten der Rissöffnungen der vier Probekörperseiten zu entnehmen und in der Darstellung der Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung (Abbildung 3.20) berücksichtigt.

Im Gegensatz zu unbewehrten Proben ist aufgrund der Faserbewehrung ein stabiles Entfestigungsverhalten nach Bildung des Makrorisses vorhanden. Zwar kommt es aufgrund der in der Maschine gespeicherten elastischen Energie zur schlagartigen Rissöffnung, jedoch werden unter zunehmender Verformung bzw. Rissöffnung einzelne Fasern aus der Matrix ausgezogen, wodurch ein schlagartiges Versagen verhindert wird. Ausrichtung und Anzahl der Fasern im Riss sowie eine ungewollte Rotation des Probekörpers beeinflussen dabei den Verlauf der Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung.

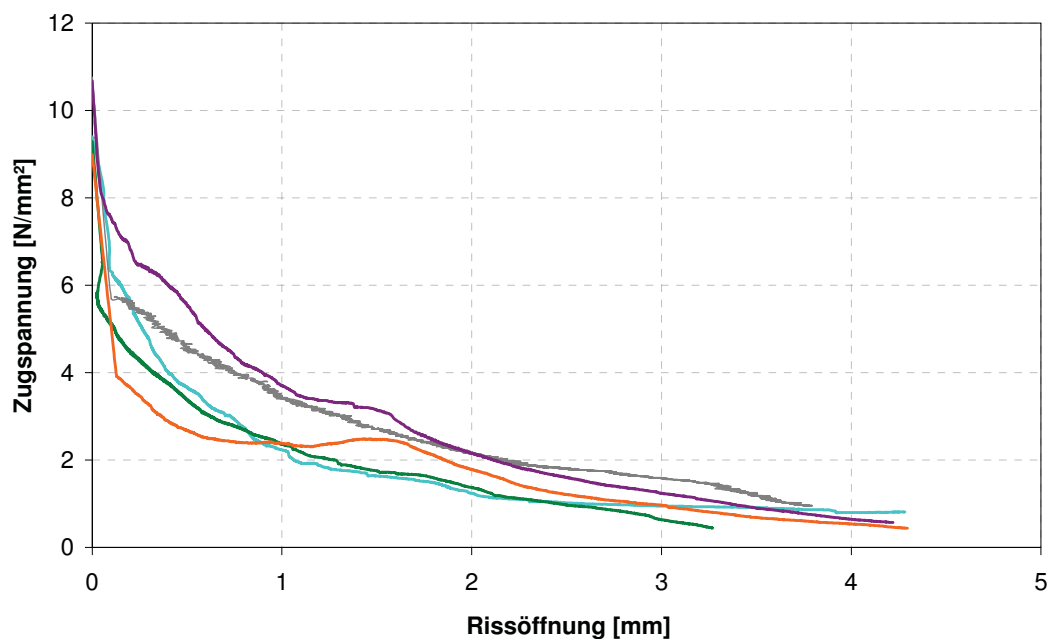


Abbildung 3.20: Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung faserbewehrter Proben (5)

Die Rissöffnung bei vollständigem Faserauszug entspricht maximal der halben Fasernlänge und der Verlauf des Faserauszugs bzw. der Entfestigung kann als „exponentiell“ charakterisiert werden.

3.5.4 Mikrobewehrter UHPC

Bis zur Entstehung des Makrorisses ist auch der Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Linie mikrobewehrter Proben linear (Abbildung 3.21). Die mittlere Zugfestigkeit ermittelt an sechs Proben beträgt $9,2 \text{ N/mm}^2$. Der zugehörige mittlere E-Modul liegt bei 51.400 N/mm^2 . Die Zugfestigkeit des Verbundbaustoffes wird durch Anordnung einer Mikrobewehrung im „unterkritischen Bereich“ somit nicht wesentlich beeinflusst; sondern allein durch die Matrixzugfestigkeit bestimmt.

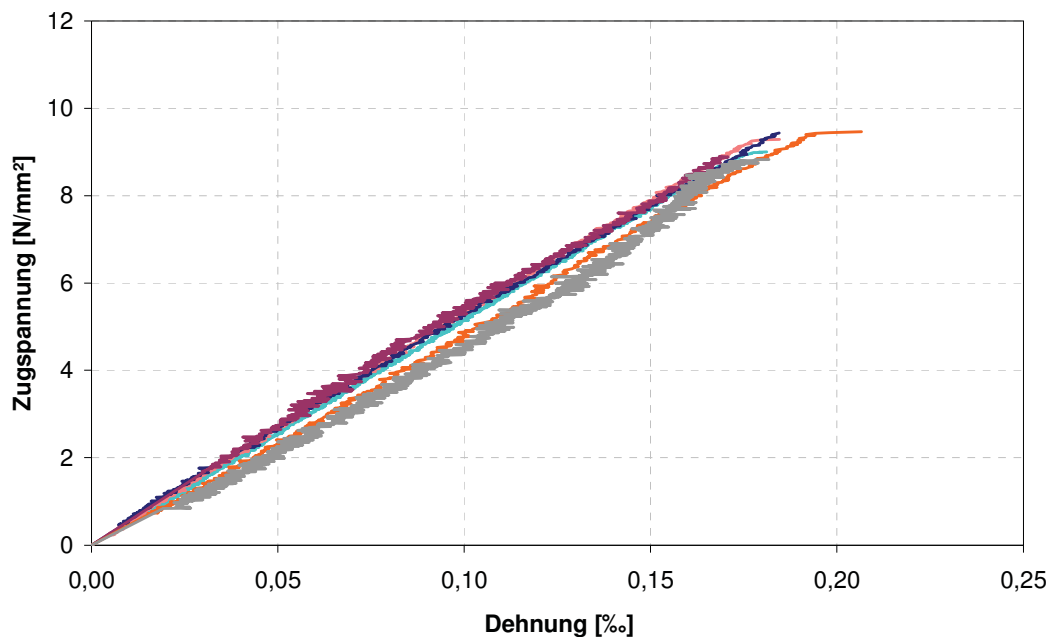


Abbildung 3.21: Spannungs-Dehnungs-Beziehung mikrobewehrter Proben (6)

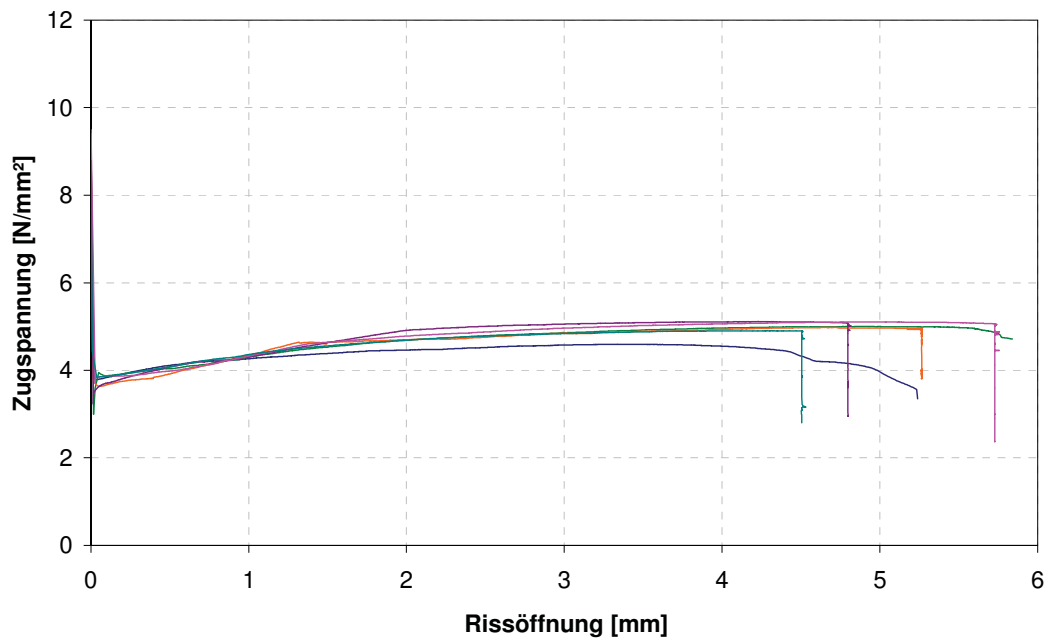


Abbildung 3.22: Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung mikrobewehrter Proben (6)

Nach Entstehung des Erstrisses wird die zuvor durch den Verbundwerkstoff übertragene Kraft allein durch die Mikrobewehrung aufgenommen. Da die Mikrobewehrung (7 Matten mit jeweils 4 Längsdrähten) eine Gesamtzugkraft von im Mittel ($9,2 \text{ N/mm}^2 \times 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$) $14,72 \text{ kN}$ nicht aufnehmen kann (= "unterkritischer Stahlgehalt"), kommt es nach dem Erstriss zu einem Kraftabfall bis zur Aktivierung der Mikrobewehrung. Bei zunehmender Verformung ist anschließend das Materialverhalten des reinen Stahls einschließlich der Verfestigung zu beobachten. Ein Auszug des Stahls wie er im Fall von einer Faserbewehrung auftritt wird bei mikrobewehrtem UHPC mit einem Stahlgehalt von 2,4 Vol.-% nicht festgestellt. Durch die Querdrähte, die senkrecht zur Zugrichtung angeordnet sind, ist die Mikrobewehrung in der Matrix fest verankert (vgl. Kapitel 3.3). Der Ort der Erstrissbildung der mikrobewehrten Prismen ist abhängig von der Konzentration der Querdrähte im Querschnitt. Für den vorliegenden Fall sind alle Mikrobewehrungsmatten derart in den Zugkörpern angeordnet, dass alle Querdrähte übereinanderliegen und nahezu keinen Versatz zueinander aufweisen. Der Rissverlauf ergibt sich entsprechend der „Fehlstellen“, d. h. entlang der Querdrähte. Die Rissöffnung bzw. die Verformung des Stahls findet lediglich auf der Länge zwischen den Querdrähten statt.

Während unbewehrter UHPC nach Erreichen der Zugfestigkeit spröde versagt, kann durch die Mikrobewehrung nach dem Erstriss weiterhin Verformung und Kraft aufgenommen (Abbildung 3.22), und damit eine Erhöhung der Duktilität erzielt werden.

3.5.5 Fazit

Die mittlere Zugfestigkeit unbewehrter Proben liegt bei 8,6 N/mm². Die zugehörige Bruchdehnung beträgt um 0,17 ‰ und der E-Modul ca. 50.000 N/mm². Ein abfallender Ast in der Spannungs-Dehnungs-Beziehung kann aufgrund der Sprödigkeit ähnlich wie im Druckversuch nicht beobachtet werden.

Faser- und mikrobewehrter UHPC zeigen gegenüber unbewehrtem UHPC neben einer erhöhten Zugfestigkeit auch einen höheren E-Modul, wobei die Zugfestigkeit faserbewehrter Proben mit im Mittel 9,9 N/mm² am höchsten ist. Durch die Fasern bzw. die Mikrobewehrung ergibt sich ein Rissverlauf entsprechend der Schwachstellen, die aus der Bewehrungszugabe bzw. Faserorientierung resultieren. Während der Verlauf der Entfestigung bedingt durch Faserauszug als exponentiell gekennzeichnet werden kann, ist der Verlauf der Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung des mikrobewehrten UHPC vollständig an das Materialverhalten der Mikrobewehrung gekoppelt. Die maximale Länge der Rissöffnung beträgt bei faserbewehrtem UHPC eine halbe Faserlänge. Mikrobewehrte Ultrahochleistungsbetone weisen aufgrund der hohen Dehnfähigkeit des Stahls und der festen Verankerung innerhalb der Matrix größere Rissöffnungen bis zum Versagen auf. Während alle faserbewehrten Proben durch Auszug der Fasern versagen, tritt das Versagen der mikrobewehrten Proben stets durch ein Reißen der Mikrobewehrung ein.

3.6 Biegetragverhalten von UHPC

3.6.1 Allgemeines

Während die Biegezugfestigkeit die Zugspannung kennzeichnet, die ein ungerissener biegebeanspruchter Querschnitt in der äußeren Randfaser besitzt, charakterisiert die Nachrissbiegezugfestigkeit „einen der Biegezugfestigkeit entsprechenden Wert des Querschnittswiderstandes nach Ausbildung von Rissen“ [RStf10]. Die Bestimmung der

Nachrissbiegezugfestigkeit dient bei stahlfaserbewehrtem Beton der Bewertung von dessen Leistungsfähigkeit und stellt ein Maß für die Duktilität des Verbundwerkstoffs dar. Auf Basis der Last-Verformungsbeziehung im Vierpunktbiegeversuch (Abbildung 3.23) wird Stahlfaserbeton in entsprechende Leistungsklassen eingeteilt. Die Biegezugfestigkeit der Leistungsklasse 1 gehört zu einer Mittendurchbiegung von 0,5 mm und ist damit für die Bemessung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit maßgebend, während die zu der Biegezugfestigkeit der Leistungsklasse 2 gehörige Durchbiegung 3,5 mm beträgt und diese für die Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit herangezogen wird.

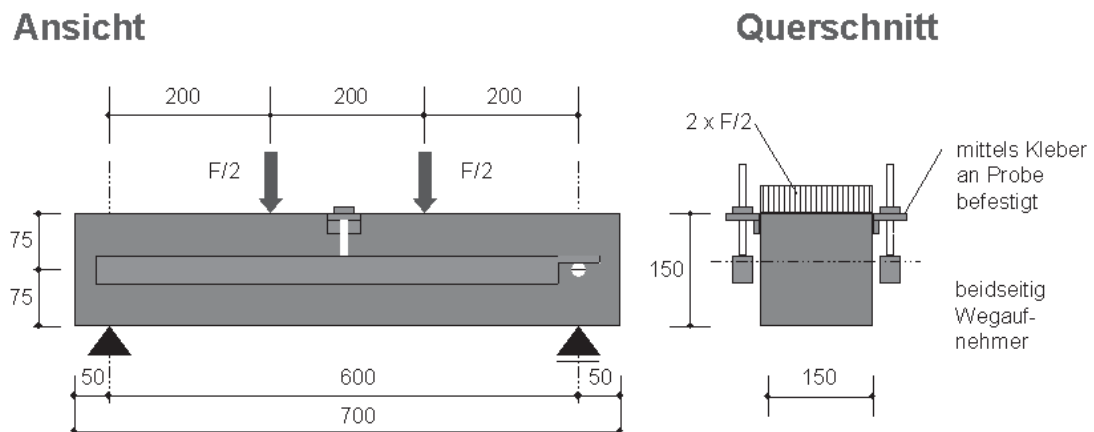


Abbildung 3.23: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Biegezugfestigkeit und Nachrissbiegezugfestigkeit [RStf10]

Der dargestellte Vierpunktbiegeversuchsaufbau eignet sich insbesondere zur Untersuchung der globalen Kraft-Verformungs-Beziehung, da hierbei konstante Bedingungen über einen größeren Bereich, als beispielsweise bei einem Dreipunktbiegeversuch mit einer Konzentration der Last an einer Querschnittsstelle, gewährleistet werden.

Um einen Vergleich von mikrobewehrtem und stahlfaserbewehrtem UHPC hinsichtlich der Biege- und Nachrissbiegezugfestigkeit vornehmen zu können, werden alle im Rahmen der in Kapitel 3.6.2 bis Kapitel 3.6.4 beschriebenen Versuche in Anlehnung an die DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton 2010-03, Anhang O [RStf10] durchgeführt. Die Auswertung der Versuche wird für faser- und mikrobewehrte Proben über Kraft-Verformungs-Beziehungen vorgenommen.

Auf eine Darstellung der Biegezugspannung wird verzichtet, da bei dem Übergang des Querschnitts in den gerissenen Zustand das Widerstandsmoment veränderlich ist. Es ist daher in den nachfolgenden Diagrammen die Maschinenkraft aufgetragen.

3.6.2 Unbewehrter UHPC

Für alle unbewehrten Proben ist die Ermittlung des Nachrissverhaltens aufgrund des spröden Versagens hinfällig. Hier wird lediglich die Biegezugfestigkeit bei Erreichen der Elastizitätsgrenze der UHPC-Matrix bestimmt. Aufgrund der geringen Durchbiegung der Balken wird anstelle der Durchbiegung die zugehörige Dehnung an der Balkenober- und Unterseite in Feldmitte mittels Dehnungsmessstreifen aufgenommen. In Abbildung 3.24 ist die Maschinenkraft über die Randdehnung aufgetragen.

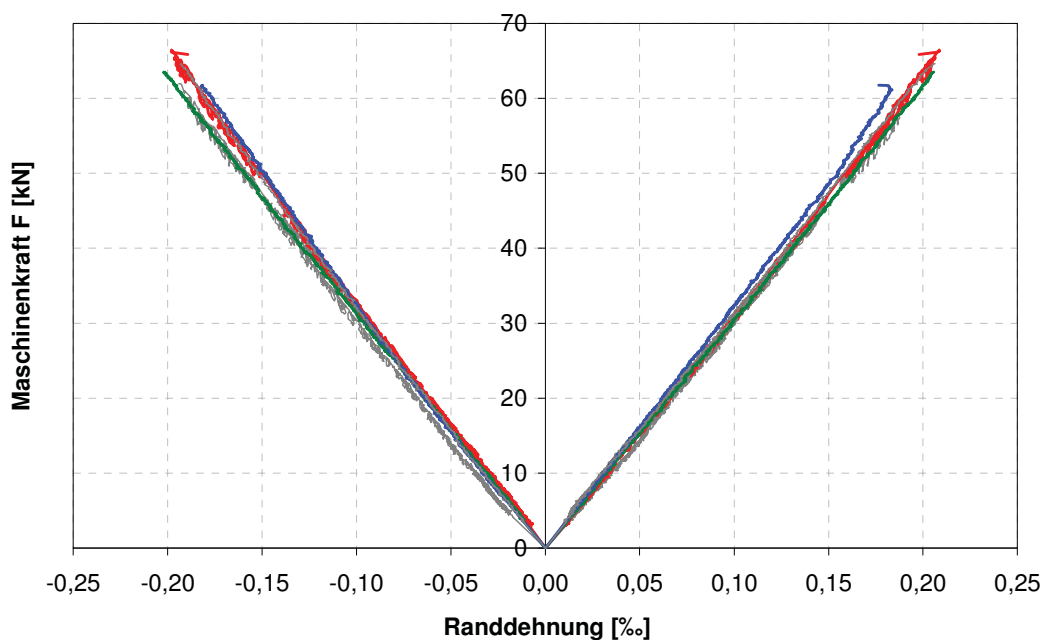


Abbildung 3.24: Maschinenkraft über die Randdehnung unbewehrter Biegebalken

Die Biegezugfestigkeit wird über

$$f_{ct,fl} = \frac{F \cdot l}{b \cdot h^2} \quad (3.1)$$

bestimmt. Der Mittelwert der Biegezugfestigkeit aus sechs Balken beträgt 11,14 N/mm² und liegt damit ca. 30 % über der zentrischen Zugfestigkeit. Der Grund hierfür ist, dass die größte Beanspruchung nur in der äußersten Randfaser entsteht und geringer beanspruchte Bereiche am Lastabtrag beteiligt werden.

Nach dem Model Code 1990 [MC90] entspricht die Biegezugfestigkeit von Balken mit einer Höhe $h = 150$ mm dem 1,5-fachen Wert der zentrischen Zugfestigkeit. Mit abnehmender Höhe wächst die Differenz zwischen zentrischer Zugfestigkeit und Biegezugfestigkeit weiter an (Maßstabseffekt). Die starke Maßstabsabhängigkeit der Biegezugfestigkeit ist auch für UHPC zu beobachten. Zusätzlich zu den Biegebalken wird die Biegezugfestigkeit des unbewehrten UHPC an Prismen (40 mm x 40 mm x 160 mm) ermittelt. Als Mittelwert aus drei Prismen ergibt sich im Dreipunktversuch (Stützweite $l = 100$ mm) eine Biegezugfestigkeit von 21,9 N/mm² ($\sim 2,5 \times f_{ct}$). Ausführliche Untersuchungen zur Maßstabsabhängigkeit von ultrahochfestem Feinkornbeton sind u. a. in [Fre11, ReiGr04] zu finden und werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht weiter verfolgt.

3.6.3 Faserbewehrter UHPC

Die mittlere Biegezugfestigkeit bei Entstehung des Erstrisses liegt bei 10,13 N/mm² und unterscheidet sich damit nur geringfügig von jener der unbewehrten Balken. Im Gegensatz zu den unbewehrten Balken kann jedoch für die faserbewehrten Balken das Nachrissverhalten bestimmt werden. Abbildung 3.25 zeigt den Verlauf der Maschinenkraft F über die Durchbiegung in Balkenmitte.

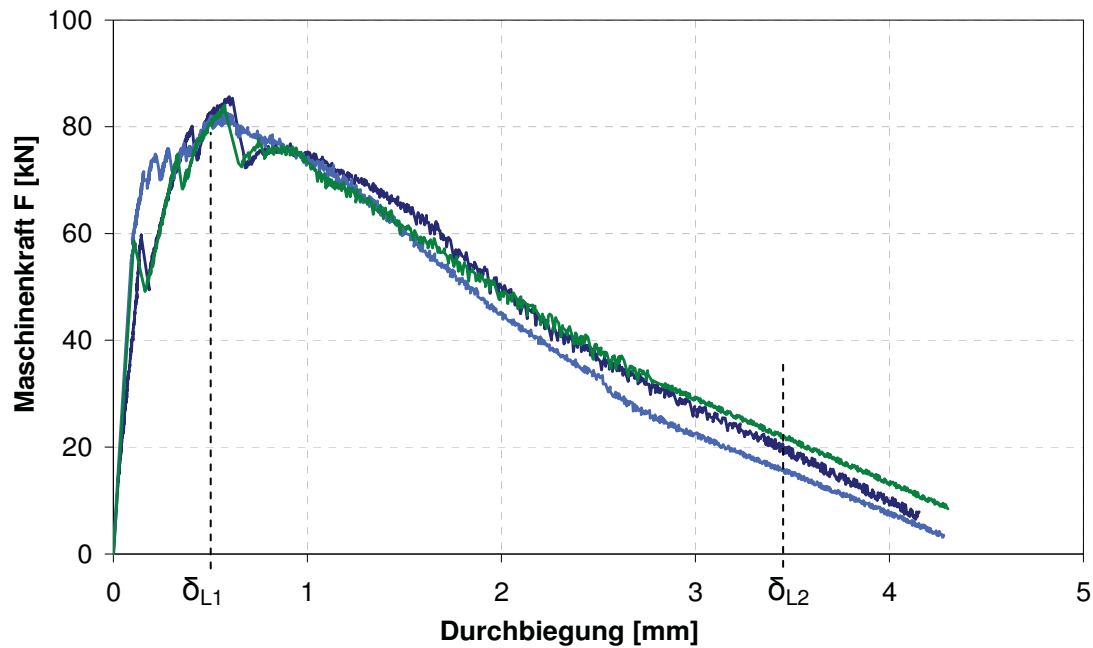


Abbildung 3.25: Maschinenkraft über die Durchbiegung in Balkenmitte faserbewehrter Balken (3)

Alle drei faserbewehrten Balken weisen jeweils nur einen Makroriss auf (Abbildung 3.26). Das Versagen tritt wie bei den faserbewehrten zentralen Zugkörpern durch Lokalisierung und damit einhergehendem Faserauszug ein.

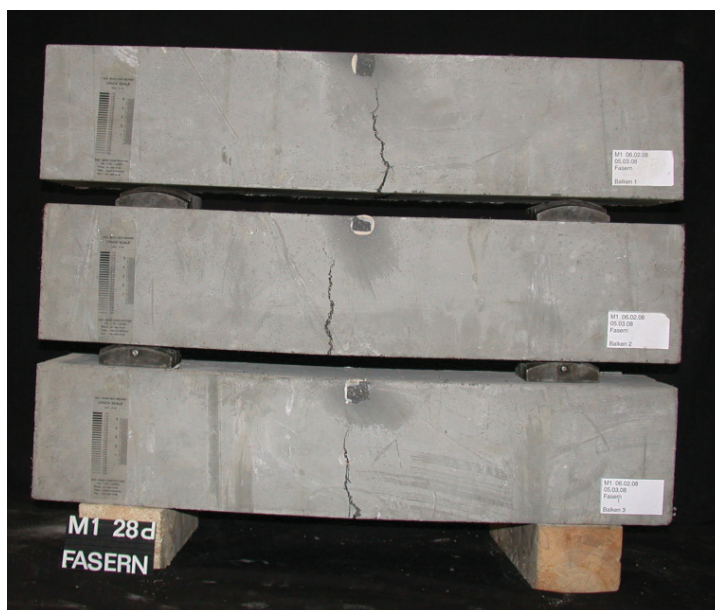


Abbildung 3.26: Balken nach Biegeversuch, Mikrodrahtfasern, 2,4 Vol.-%

Gemäß [RStf10] kann die mittlere Nachrissbiegezugfestigkeit über die zu den Durchbiegungen von $\delta_{L1} = 0,5$ mm und $\delta_{L2} = 3,5$ mm zugehörige Belastung F wie folgt ermittelt werden:

$$f_{\text{cflm,L1}}^f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{F_{0,5,i} \cdot l}{b_i \cdot h^2} \quad (3.2)$$

$$f_{\text{cflm,L2}}^f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{F_{3,5,i} \cdot l}{b_i \cdot h^2} \quad (3.3)$$

Die Ergebnisse der mittleren Nachrissbiegezugfestigkeiten betragen $f_{\text{cflm,L1}}^f = 14,44$ N/mm² bzw. $f_{\text{cflm,L2}}^f = 3,29$ N/mm². Für kurze Fasern mit glatter Oberfläche, wie sie hier vorliegen, ist der Regelfall, dass der zu Leistungsklasse 1 (Durchbiegung $\delta_{L1} = 0,5$ mm) zugehörige Wert der Biegezugfestigkeit den der zu Leistungsklasse 2 (Durchbiegung $\delta_{L2} = 3,5$ mm) zugehörigen Wert deutlich übersteigt. Durch Veränderung der Fasergeometrie, -oberfläche und -endung kann das Verhältnis jedoch in starkem Maß beeinflusst werden.

3.6.4 Mikrobewehrter UHPC

Vorbemerkung

Die mikrobewehrten Balken werden je nach Orientierung der Mikrobewehrungsmatten innerhalb der Balken unterschiedlich bezeichnet. Alle Proben, bei denen die Mikrobewehrungsmatten vertikal (parallel zur Kraftrichtung) angeordnet sind, tragen am Ende der Bezeichnung ein „v“, eine horizontale Anordnung (senkrecht zur Belastungsrichtung) ist entsprechend mit einem „h“ gekennzeichnet (Abbildung 3.27).

Für den Vergleich zwischen Faser- und Mikrobewehrung kommt zunächst wieder ausschließlich der Mikrobewehrungstyp MB1 zum Einsatz. Die Matten sind gleichmäßig über den Balkenquerschnitt verteilt. Gewährleistet wird diese gleichmäßige Anordnung über speziell zu diesem Zweck entwickelte Abstandhalter (Abbildung 3.28). Diese Abstandhalter weisen eine kammartige Form auf. Die einzelnen Zinken des Kamms stellen die Abstände der Matten untereinander sicher. Während des Einbaus des UHPC in die Schalung werden die Mikrobewehrungsmatten so in ihrer Lage gesichert. Während der letzten 30 s des Verdichtens auf dem Rütteltisch werden die Abstandhalter entfernt.

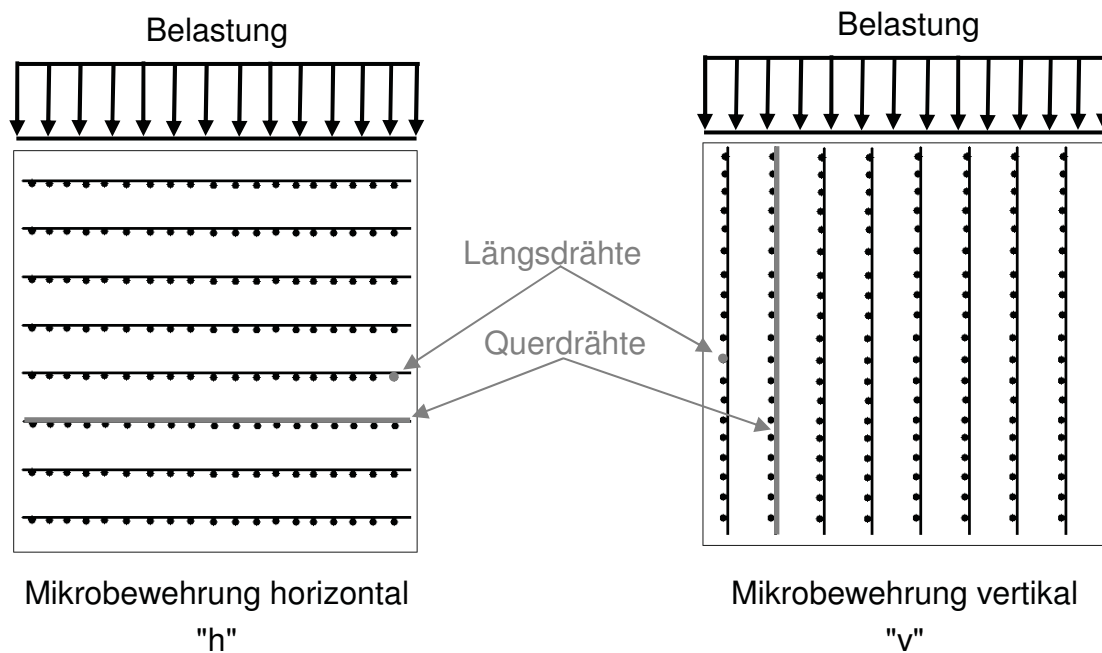


Abbildung 3.27: Definition der Mikrobewehrungsmattenanordnung (schematisch)



Abbildung 3.28: Beispiel eines Abstandhalters (Prinzip, links) und mit Abstandhalter und Mikrobewehrung vorbereitete Schalung (rechts)

Alle mikrobewehrten Balken werden unabhängig von der Ausrichtung der Mikrobewehrungsmatten auf identische Art und Weise hergestellt, mit der Folge, dass alle Balken mit einer Anordnung der Mikrobewehrung horizontal, senkrecht zur Betonierrichtung geprüft werden und alle Balken mit einer Anordnung der Mikrobewehrung vertikal, in Betonierrichtung geprüft werden. Für den Fall unebener Prüfflächen infolge einer ungeschalteten Oberfläche wird im Bereich der Auflagerung bzw. Lasteinleitung ein Mörtelbett ergänzt. Die Prüfung un- und faserbewehrter Proben erfolgt an Balken, welche um

90° um die Längsachse gekippt sind, sodass die Betonierfläche eine Seitenfläche darstellt und Auflager- sowie Lasteinleitungsfläche ebene Schalflächen sind. Gesonderte Untersuchungen zum Einfluss möglicher Inhomogenitäten infolge des Betoniervorgangs wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht durchgeführt.

Ergebnisse

Die Verläufe der aufnehmbaren Kraft über die Mittendurchbiegung mikrobewehrter Balken können Abbildung 3.29 und Abbildung 3.30 entnommen werden. Für den dritten Balken mit horizontaler Anordnung der Mikrobewehrung war die Protokolldatei nicht verwertbar.

Unabhängig von der Ausrichtung der Mikrobewehrung bildet sich zunächst ein Biegeriss mit einem daraus resultierenden Kraftabfall. Die mittlere Elastizitätsgrenze der Biegerandzugspannung beträgt 10,10 N/mm² und ist unabhängig von der Ausrichtung der Mikrobewehrung. Dass die Biegerandzugspannung beim Erstriss für mikrobewehrte Balken geringer ist, als für unbewehrte Balken liegt zum einen an Eigenspannungen infolge der durch die Drahtgittermatten erhöhten Schwindbehinderung und zum anderen an den konzentriert angeordneten Querdrähten, die zunächst eine Querschnittsschwächung darstellen.

Nach Überschreitung des elastischen Bereichs folgt die Phase der Mehrfachrissbildung. Anhand der einzelnen Steifigkeitsverluste ist die Rissentstehung der Balken innerhalb der Kraft-Verformungs-Linie gut nachzuvollziehen (vgl. auch Abbildung 3.31 und Abbildung 3.32). Während dieser Phase ist eine Kraftsteigerung bis zum Erreichen der maximalen Biegetragfähigkeit möglich. Es kommt zur Lokalisierung eines Risses mit steigender Rissöffnung und Dehnung der Bewehrung (teilweise sogar bis zum Reißen dieser) begleitet von einer abfallenden Tragfähigkeit.

Die Bestimmung der mittleren Nachrissbiegezugfestigkeit erfolgt analog zur Bestimmung jener von faserbewehrtem UHPC. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.6 zusammengestellt.

Tabelle 3.6: Nachrissbiegezugfestigkeiten mikrobewehrter Balken (MB1-h und -v)

Nachrissbiegezugfestigkeit [N/mm ²]	mikrobewehrt	
	horizontal	vertikal
$f_{cflm,L1}$	10,40	9,74
$f_{cflm,L2}$	(13,28) 9,40	(12,63) 10,20

Während die Nachrissbiegezugfestigkeit für die Balken mit horizontaler Ausrichtung der Mikrobewehrung bei steigender Durchbiegung abnimmt, führt die vertikale Ausrichtung der Mikrobewehrung zu einer Steigerung der Nachrissbiegezugfestigkeit für eine Durchbiegung von 3,5 mm. Da infolge der verstärkten Rissbildung die Last-Durchbiegungs-Kurven der mikrobewehrten Balken im Intervall 0,5 mm bis 3,5 mm nicht monoton verlaufen (vgl. Abbildung 3.29 und Abbildung 3.30), werden gemäß [RStf10] die niedrigsten Werte der Maschinenkraft im Intervall 0,5 mm bis 3,5 mm zur Berechnung der Nachrissbiegezugfestigkeit herangezogen. Die Werte, die aus der Durchbiegung $\delta_{L2} = 3,5$ resultieren sind daher durchgestrichen.

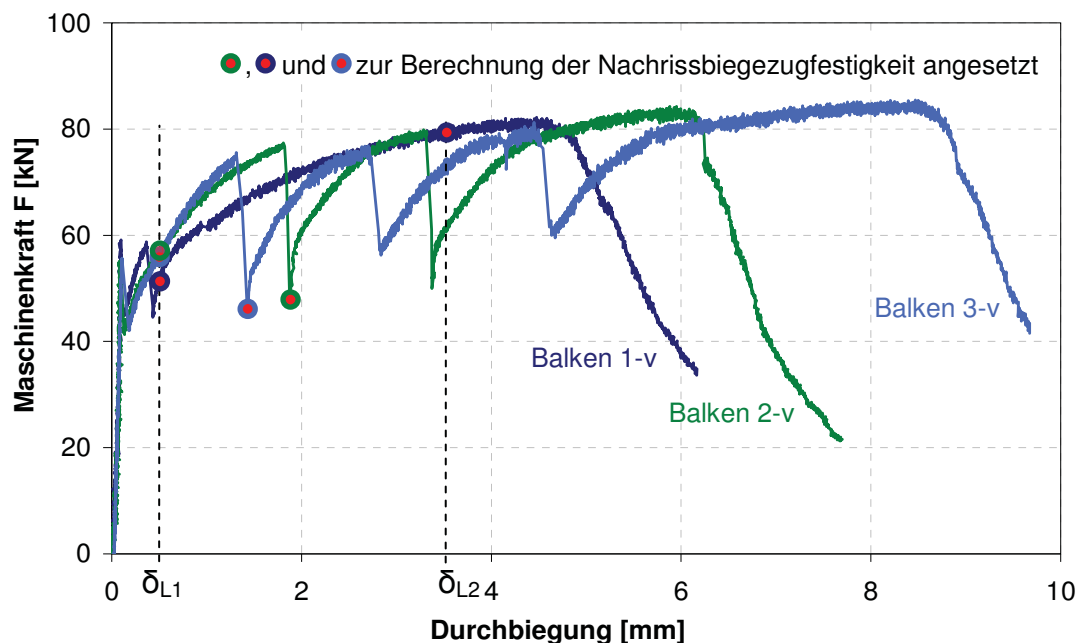


Abbildung 3.29: Kraft-Durchbiegungs-Beziehung, MB1-v (3)

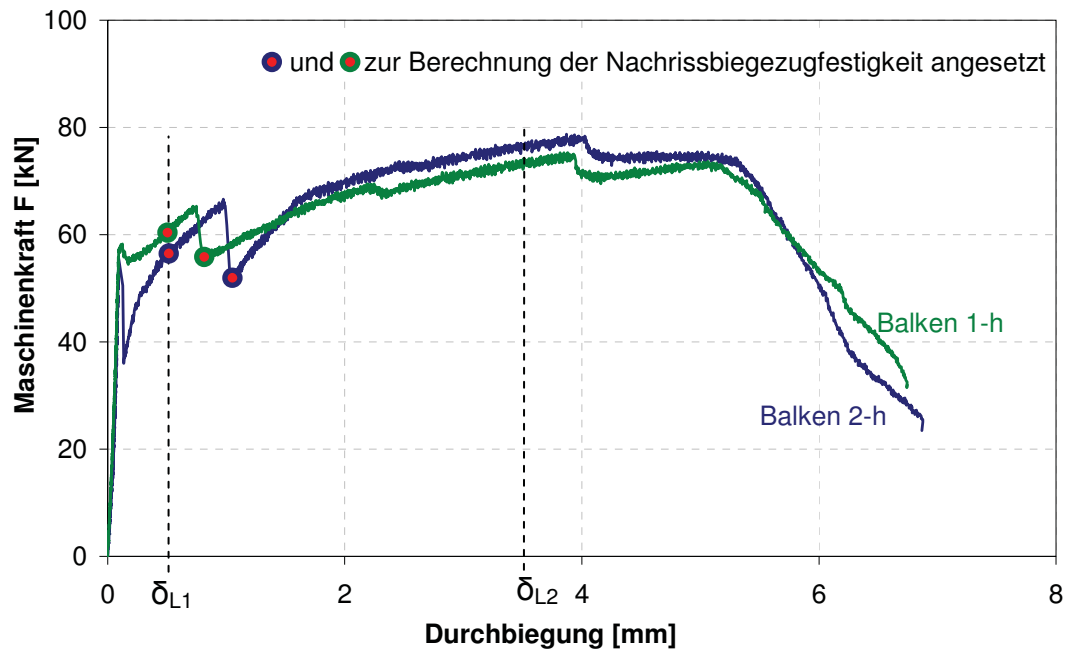


Abbildung 3.30: Kraft-Durchbiegungs-Beziehung, MB1-h (2)

Die zur Berechnung angesetzten Werte sind in Abbildung 3.29 und Abbildung 3.30 mit einem Punkt markiert. Infolge der Rissbildung, welche in den Kraft-Durchbiegungs-Kurven durch einen Kraftabfall zu erkennen ist, variieren die zur Berechnung der Nachrissbiegezugfestigkeit $f_{cflm,L2}$ herangezogenen Kräfte stark. Während für eine vertikale Ausrichtung der Mikrobewehrung für die Balken 2 und 3 eine Rissbildung im Durchbiegungsintervall 0,5 mm bis 3,5 mm stattfindet (zugehörige Kraft $F = 45,1$ kN bzw. $F = 47,2$ kN), entstehen bei dem Balken 3 (Abbildung 3.29, dunkelblaue Kurve) in diesem Intervall keine neuen Risse (zugehörige Kraft $F = 79,8$ kN). Für eine Bestimmung der Nachrissbiegezugfestigkeit aus dem Mittelwert der Kräfte gemäß Gleichung (3.3) folgt daher für die drei Balken mit einer vertikalen Ausrichtung der Mikrobewehrung eine Steigerung der Nachrissbiegezugfestigkeit $f_{cflm,L2}$ gegenüber $f_{cflm,L1}$. Bei der Ausrichtung der Mikrobewehrung in horizontaler Richtung entstehen im Intervall 0,5 mm bis 3,5 mm ebenfalls Risse entlang der Balkenachse, weshalb auch hier die zu einer Durchbiegung von 3,5 mm zugehörige Kraft nicht zur Berechnung der Nachrissbiegezugfestigkeit angesetzt wird. Damit besitzt die Nachrissbiegezugfestigkeit $f_{cflm,L2}$ sowie das Verhältnis $f_{cflm,L1} / f_{cflm,L2}$ eine sehr starke Abhängigkeit von der Rissbildung im Durchbiegungsintervall $\delta_{L1} = 0,5$ mm bis $\delta_{L2} = 3,5$ mm. Weiterhin werden durch die Berücksichtigung der Durchbiegung bis 3,5 mm Maximalwerte der Nachrissbiegezugfestigkeit mikrobewehrter Balken nicht erfasst. Die Anwendbarkeit der Bewertungsme-

thode bzgl. der Biegetragfähigkeit für faserbewehrte Bauteile [RStf10] auf mikrobewehrte Bauteile ist aus den oben genannten Gründen nicht gegeben (vgl. auch Kapitel 3.6.6).

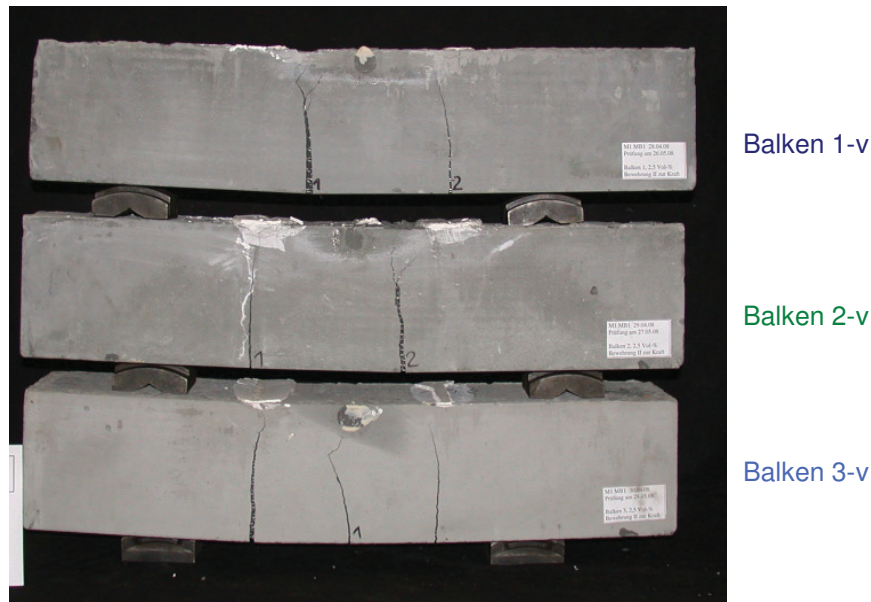


Abbildung 3.31: Balken nach Biegeversuch, MB1-v



Abbildung 3.32: Balken nach Biegeversuch, MB1-h

Variationen

Neben der direkten Gegenüberstellung von Faser- und Mikrobewehrung wird auch der Einfluss des Durchmessers sowie der Maschenweite der Mikrobewehrung auf das Trag- und Verformungsverhalten mikrobewehrter UHPC-Biegekörper untersucht. Weiterhin werden experimentelle Untersuchungen an Proben mit einem höheren Mikrobewehrungsgehalt durchgeführt, sowie die Auswirkung einer unterschiedlichen Ausrichtung der Mikrobewehrungsmatten innerhalb des biegebeanspruchten Querschnitts ermittelt.

Um die Effekte der unterschiedlichen Parameter eingehend analysieren zu können werden insgesamt 48 Biegebalken gemäß dem in Abbildung 3.23 dargestellten Versuchsaufbau getestet. Die Ausrichtung der Mikrobewehrung ist bei 24 Balken horizontal und bei 24 Balken vertikal. Eine Übersicht über das Untersuchungsprogramm ist in Tabelle 3.7 zusammengestellt.

Tabelle 3.7: Variation der Parameter (jeweils 3 Proben)

Mikrobewehrungstyp	Stahlgehalt
MB1 (Ø 1,0, MW 11)	2,6
	5,1
MB3 (Ø 1,5, MW 17,5)	2,5/3,0*
	6,1
MB4 (Ø 1,5, MW 21,5)	2,4
	4,7
MB5 (Ø 2,0, MW 22)	2,7
	5,4

*Anordnung horizontal 2,5 Vol.-%, vertikal 3,0 Vol.-%

Zur Übersichtlichkeit sind die Versuchskörper nach folgendem Schema bezeichnet:

Mikrobewehrungstyp - Stahlgehalt - Probekörpernummer - Ausrichtung

wobei die Probekörpernummer ebenfalls die Information über die Ausrichtung der Mikrobewehrung enthält.

Beispiel: MB3-2,5-4-h: Balken mit Mikrobewehrung "MB3", "2,5" Vol.-% Stahlgehalt, Probekörpernummer "4" mit Ausrichtung der Mikrobewehrungsmatten horizontal.

Abbildung 3.33 zeigt eine Übersicht aller Kraft-Verformungs-Beziehungen der untersuchten Biegebalken. Dabei sind auf der linken Seite alle Diagramme mit einer Anordnung der Mikrobewehrung horizontal und auf der rechten Seite entsprechend diejenigen mit einer Anordnung der Mikrobewehrung vertikal dargestellt. In jedem Diagramm sind die Ergebnisse für den einfachen und doppelten Stahlgehalt zusammen aufgeführt. Grundsätzlich gehören zu einer Serie jeweils drei Balken. Aufgrund des temporären Ausfalls einiger Wegaufnehmer zur Bestimmung der Durchbiegung sind in einzelnen Diagrammen lediglich die Ergebnisse von ein oder zwei Balken dargestellt.

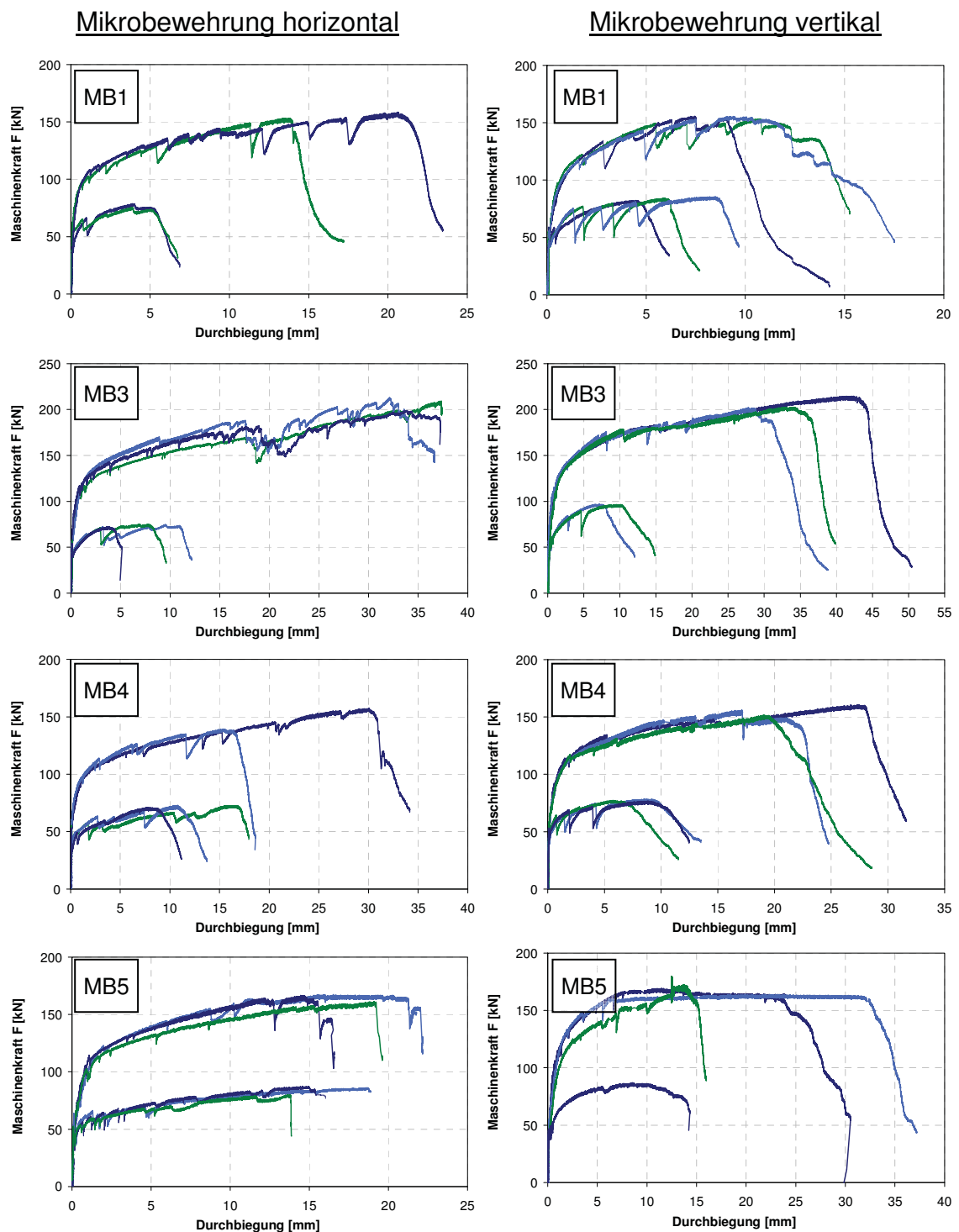


Abbildung 3.33: Kraft-Verformungs-Verläufe der Biegebalken

a) Variation der Mikrobewehrungsausrichtung

Vorab ist zu erwähnen, dass alle Balken unter Zuhilfenahme der Abstandhalter (Abbildung 3.28) hergestellt wurden. Es ist offensichtlich, dass bereits geringe Lageverschiebungen der Mikrobewehrungsmatten (bedingt durch das Rütteln nach Entfernen der Abstandhalter) einen Einfluss auf die Tragfähigkeit der Balken besitzen. Für die Balken mit einer horizontalen Anordnung der Mikrobewehrung ist der Einfluss, wie in Abbildung 3.34 verdeutlicht, durch eine stark veränderte Anzahl an Längsdrähten in der äußersten Zugfaser stärker ausgeprägt. Aus diesem Grund existieren auch in den Kraft-Verformungs-Beziehungen für diese Ausrichtungen größere Streuungen der Versuchsergebnisse.

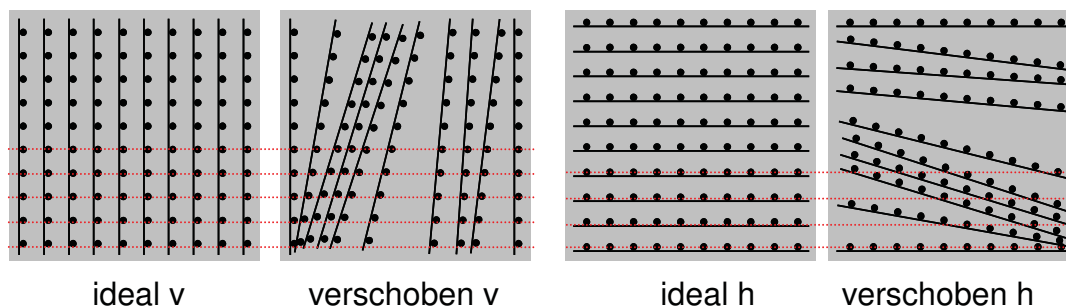
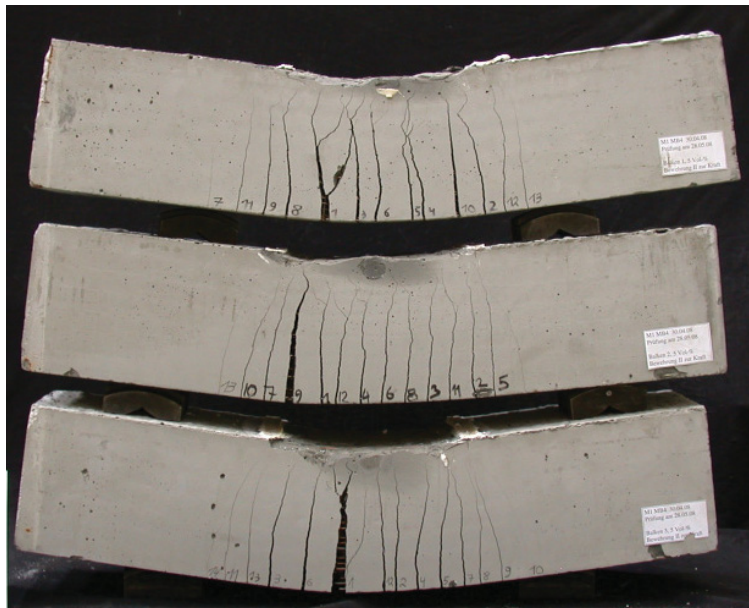


Abbildung 3.34: Lageabweichung der Mikrobewehrungsmatten infolge Verdichtung

Am besten ist der Einfluss der Mikrobewehrungsausrichtung anhand von Proben mit einem hohen Mikrobewehrungsgehalt zu veranschaulichen. Exemplarisch werden daher zur Erläuterung des Einflusses die Versuchsergebnisse der Balken mit den Mikrobewehrungstypen MB3 und MB4 und zugehörigen Stahlgehalten von 6,1 Vol-% respektive 4,7 Vol.-% herangezogen. Für gleiche Mikrobewehrungstypen werden die Ergebnisse unterschiedlicher Ausrichtung gegenübergestellt.

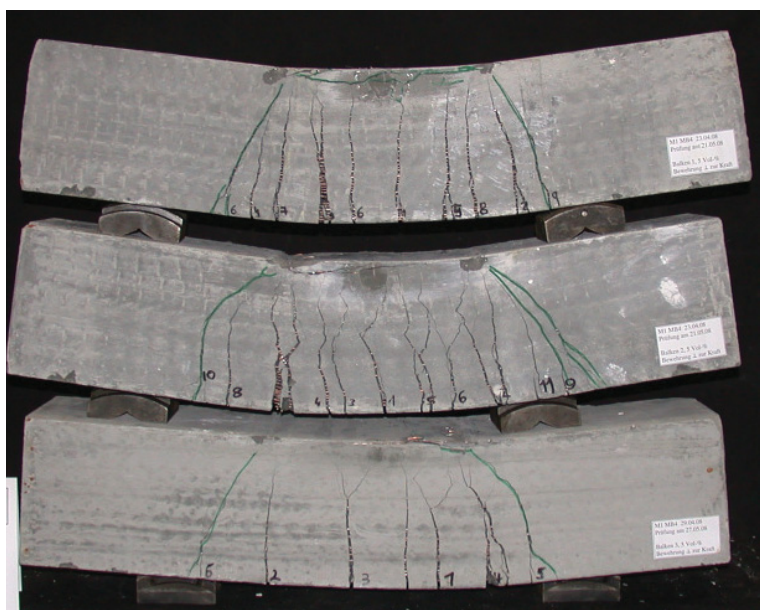


MB4-4,7-57-v

MB4-4,7-58-v

MB4-4,7-59-v

Abbildung 3.35: Balken nach Biegeversuch, Bewehrung vertikal



MB4-4,7-57-h

MB4-4,7-58-h

MB4-4,7-59-h

Abbildung 3.36: Balken nach Biegeversuch, Bewehrung horizontal

Ein Vergleich der Fotos nach Versuchsende zeigt, dass sich für die vertikal bewehrten Balken (Abbildung 3.35) vor allem Risse im biegebeanspruchten Bereich des Balkens ergeben, während die Balken mit horizontaler Ausrichtung der Mikrobewehrungsmatten (Abbildung 3.36) auch eine ausgeprägte Rissbildung im biege- und querkraftbean-

spruchten Bereich aufweisen. Daneben wird für diesen hohen Bewehrungsgehalt die Tragfähigkeit der Druckzone erreicht. Bei Balken mit einer horizontalen Mattenausrichtung werden die Matten in der Druckzone stark gestaucht, was zu einem Ausknicken der obersten Matten führt (Abbildung 3.37). Der Beginn der Druckzonenschädigung ist in der Arbeitslinie durch einen Kraftabfall sowie eine daran anschließende verringerte Steifigkeit zu erkennen (Abbildung 3.40, blaue Kurve). Trotz des Ausknickens der oberen Mikrobewehrungsmatten kommt es zu einem duktilen Versagen, wobei die Kraft unter steigender Verformung weiter aufgenommen und sogar bis zum Reißen der Mikrobewehrungslagen noch gesteigert werden kann.

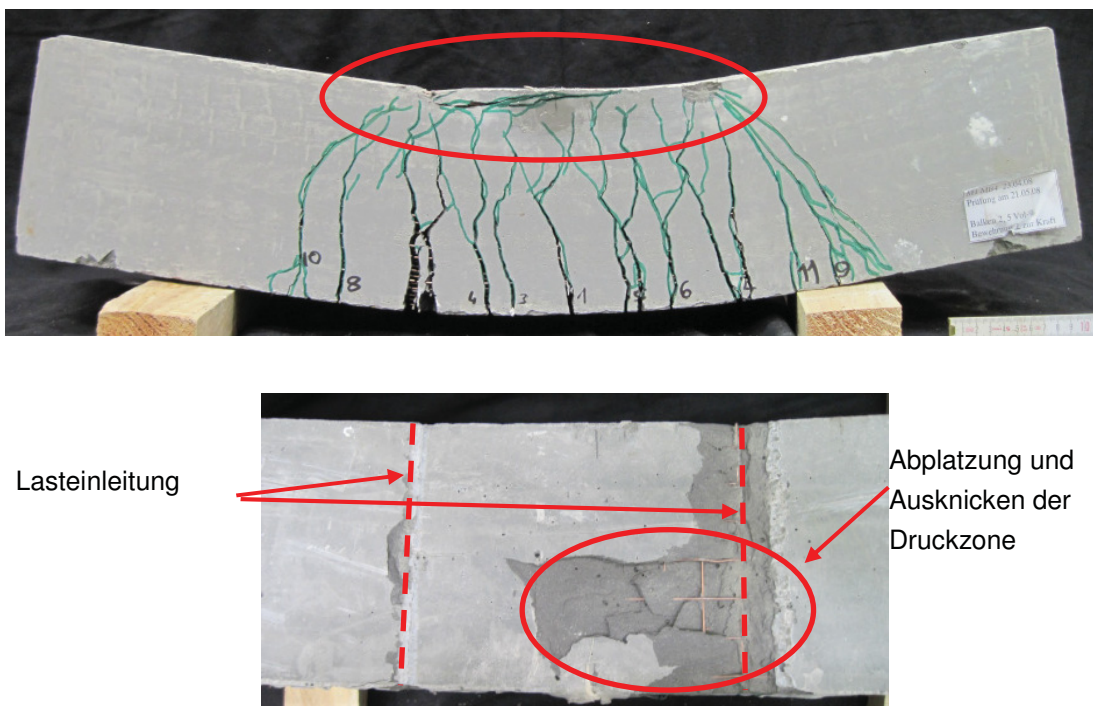


Abbildung 3.37: Zerstörte Druckzone in Ansicht (oben) und Draufsicht (unten, Detail Druckzone), Abplatzungen und ausgeknickte Drähte, MB4-4,7-58-h

Abbildung 3.38 zeigt exemplarisch das Versagen der Biegedruckzone für einen Balken mit einem höheren Bewehrungsgehalt von 5,4 Vol.-%.



Abbildung 3.38: Detail zerstörte Druckzone MB5-5,4-60-h

Auch die Balken mit einer vertikalen Ausrichtung der Mikrobewehrung weisen eine Schädigung der Druckzone durch zu große Stauchung auf. Allerdings können lediglich Abplatzungen bis zur Oberkante der Vertikaleisen festgestellt werden (Abbildung 3.39). Die horizontalen Drähte knicken bei dieser Anordnung der Mikrobewehrung nicht aus.

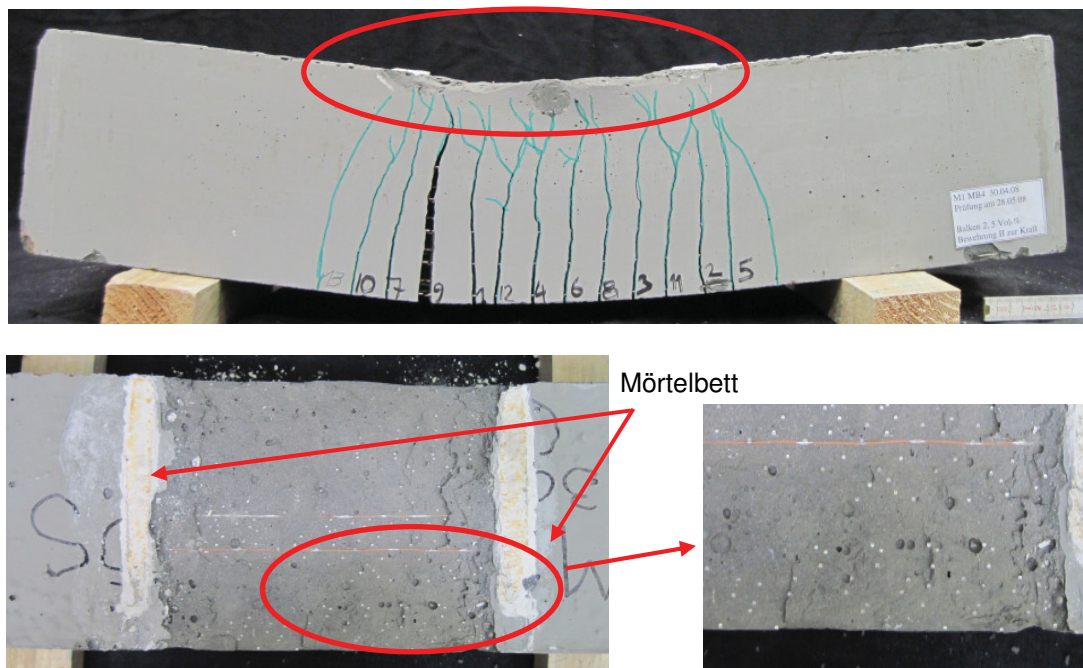


Abbildung 3.39: Zerstörte Druckzone in Ansicht (oben) und Draufsicht (unten, Detail Druckzone), Abplatzungen bis auf Vertikaldrähte, MB4-4,7-58-v

Bei einem Vergleich der Kraft-Verformungs-Linien (Abbildung 3.40) fällt auf, dass die Balken mit einer vertikalen Bewehrungsausrichtung ein steiferes Verhalten aufweisen. Dies gilt für alle untersuchten Probekörper, auch jene mit einem geringeren Bewehrungsgehalt. Die Ursache hierfür liegt in der Länge der gerissenen Bereiche entlang der Balkenlänge. Während die Proben mit einer Ausrichtung der Matten vertikal nur im Bereich zwischen den Lasteinleitungspunkten eine verminderte Steifigkeit infolge Rissbildung aufweisen, verteilen sich die Risse bei den horizontal bewehrten Balken über eine größere Balkenlänge, was zu längeren Bereichen mit reduzierter Steifigkeit führt. Ein weiterer Grund der höheren Balkensteifigkeit liegt in der Steifigkeit der Mattenstruktur bei Einbau in vertikaler Richtung selbst (Abbildung 3.41).

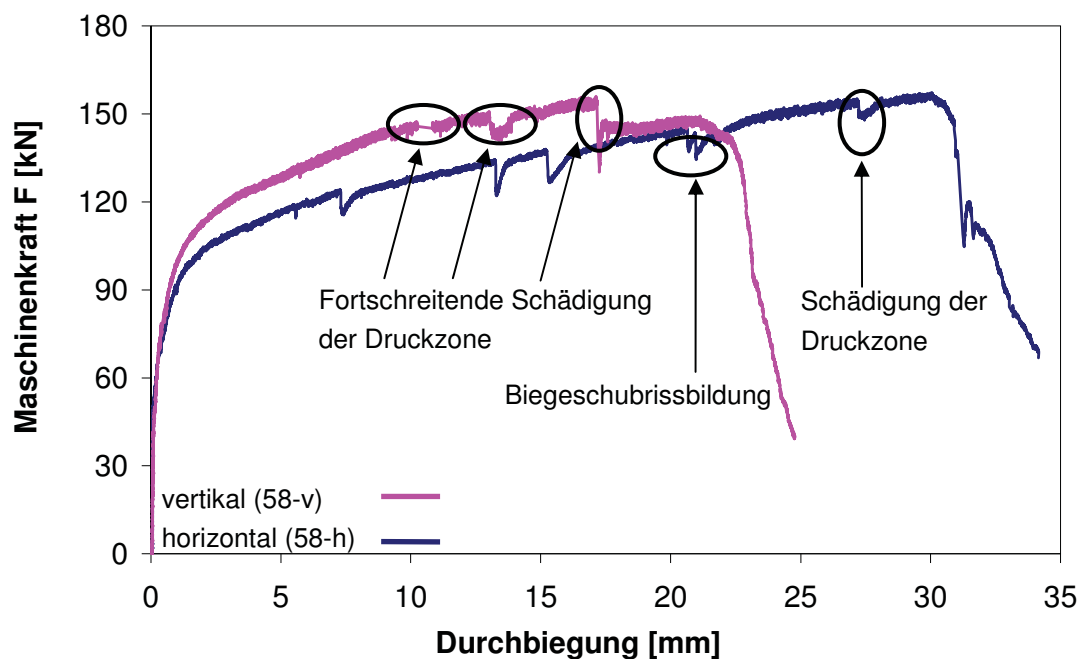


Abbildung 3.40: Kraft-Verformungs-Linie, MB4, 4,7 Vol.-%, unterschiedliche Ausrichtung

Das Versagen aller Balken ist unabhängig von der Ausrichtung der Mikrobewehrungsmatten sehr duktil. Während bei hoch bewehrten Balken die Druckzone großflächig zwischen den Lasteinleitungspunkten versagt und es durch sukzessive Verformungszunahme zu einem Reißen der einzelnen Drähte und einem darauffolgenden Versagen kommt, wird die Druckzone bei geringer bewehrten Balken durch einzelne Risse lokal

stark eingeschnürt bis zur Lokalisierung eines einzelnen Risses mit Reißen einzelner Mikrobewehrungslagen.

Ein Vergleich der erreichten Maximalkräfte (Abbildung 3.40 und Tabelle 3.8) zeigt, dass eine vertikale gegenüber einer horizontalen Ausrichtung zu einer Erhöhung der aufnehmbaren Maximallast um bis zu 10 % führt. Balken mit einer vertikalen Mikrobewehrungsanordnung verhalten sich zudem steifer und weisen daher ein kürzeres plastisches Plateau bis zum Versagen auf.

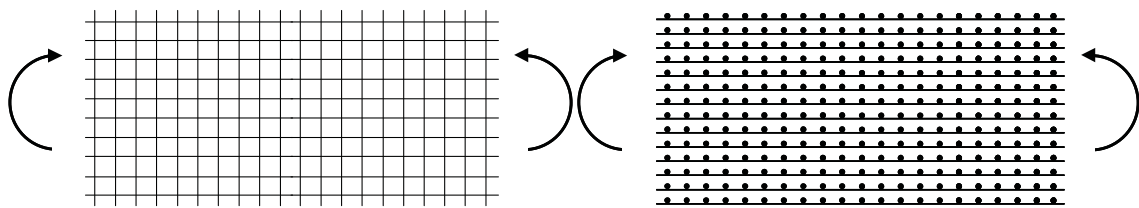


Abbildung 3.41: Erhöhte Steifigkeit der Mikrobewehrung selbst

Die positive Wirkung der Vertikaldrähte auf die Querkrafttragfähigkeit wurde auch bereits in [ScPr12, BuEm16] diskutiert und lässt sich am Beispiel der Balken mit einem Mikrobewehrungsgehalt von 6,1 Vol.-% und dem Mikrobewehrungstyp MB3 zeigen. Während alle Balken mit einer horizontalen Mikrobewehrungsanordnung nach Mehrfachrissbildung einen ausgeprägten, Versagen bestimmenden Querkrafttriss aufweisen (Abbildung 3.42), kommt es für die vertikal bewehrten Balken zu einem Biegeversagen durch Erreichen der Druckzonentragfähigkeit mit einhergehendem Reißen der Mikrobewehrungsdrähte (Abbildung 3.43).

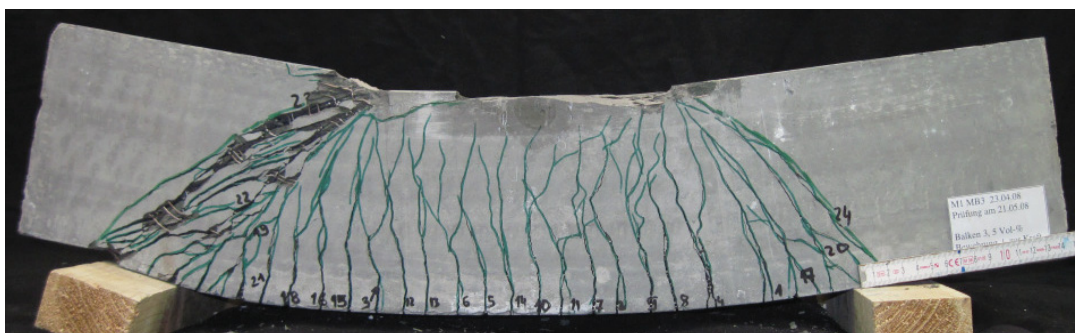


Abbildung 3.42: Balken nach Biegeversuch, MB3-6,1-56-h

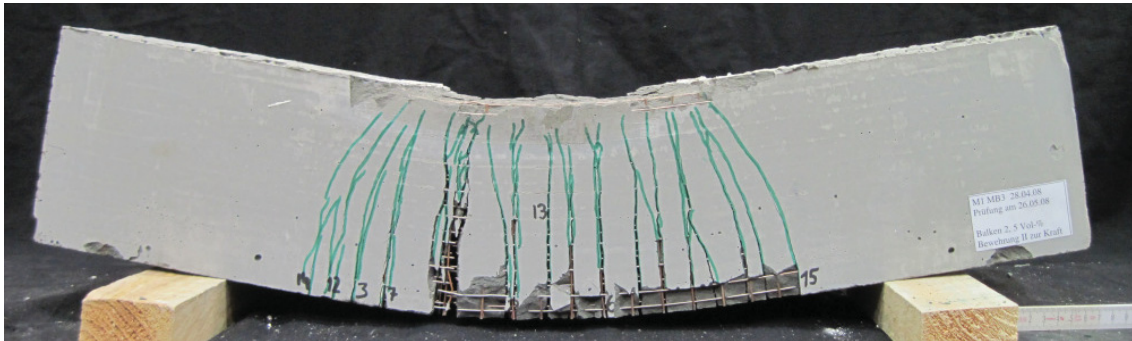


Abbildung 3.43: Balken nach Biegeversuch, MB3-6,1-55-v

Abbildung 3.44 zeigt die zugehörigen Kraft-Verformungs-Beziehungen der beiden Balken. Auch hier sind neben den Biege- und Biegeschubrissen die einzelnen Schädigungsmechanismen eindeutig zu erkennen.

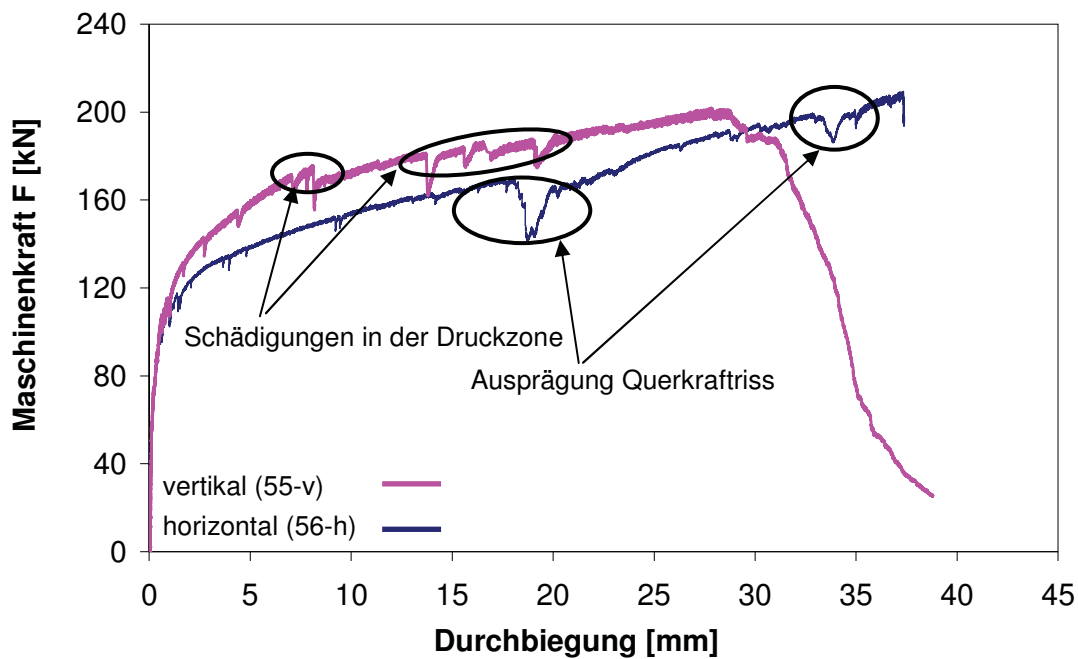


Abbildung 3.44: Kraft-Verformungs-Linie, MB3, 6,1 Vol.-%, unterschiedliche Ausrichtung

Tabelle 3.8: Maximalkräfte aller 48 Biegebalken

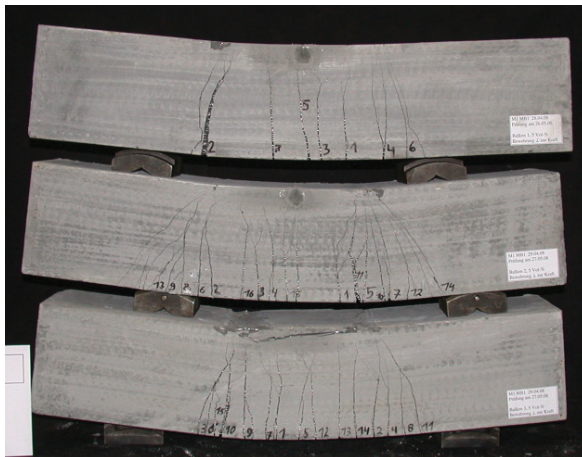
Ausrichtung	Mikrobewehrungs- typ	Stahlgehalt [Vol.-%]	Probekörper- nummer	Maximalkräfte (Mittelwerte) [kN]
horizontal	MB1	2,6	1 - 3	77,0
	MB3	2,5	4 - 6	74,0
	MB4	2,4	7 - 9	72,1
	MB5	2,7	10 - 12	80,0
	MB1	5,1	51 - 53	156,5
	MB3	6,1	54 - 56	204,0/178,3*
	MB4	4,7	57 - 59	149,0
	MB5	5,4	60 - 62	165,2
	MB1	2,6	1 - 3	84,4
	MB3	3,0	4 - 6	96,5
vertikal	MB4	2,4	7 - 9	77,4
	MB5	2,7	10 - 12	88,2
	MB1	5,1	51 - 53	154,9
	MB3	6,1	54 - 56	206,3
	MB4	4,7	57 - 59	156,0
	MB5	5,4	60 - 62	170,9

*ausgeprägter Querkraftriß

Alle Balken wurden im Alter von 28 Tagen geprüft. Die zugehörige mittlere Druckfestigkeit der Begleitprobekörper (Zylinder Ø150 mm/ H = 300 mm) ohne Mikrobewehrung beträgt 151 N/mm².

b) Variation der Maschenweite

Mit einer Variation der Maschenweite wird unabhängig von der Ausrichtung der Mikrobewehrungsmatten direkt der Anteil an Querdärhten über die gesamte Balkenlänge verändert. Für den Mikrobewehrungstyp MB1 mit geringster Maschenweite liegen 19 Querdärhte im Bereich konstanter Momentenbeanspruchung, während für den Mikrobewehrungstyp MB4, mit nur noch 10 Querdärhten, die Anzahl an Querdärhten auf nahezu die Hälfte reduziert ist. Es ist aufgrund der rissinitiierenden Wirkung der Querdärhte durch Erzeugung einer Gefügestörung daher zu erwarten, dass sich bei annähernd gleichem Stahlgehalt entsprechend eine größere Anzahl an Rissen für die Balken mit Mikrobewehrungstyp MB1 einstellen. In Abbildung 3.45 und Abbildung 3.46 ist die Rissanzahl für die geprüften Balken angegeben.

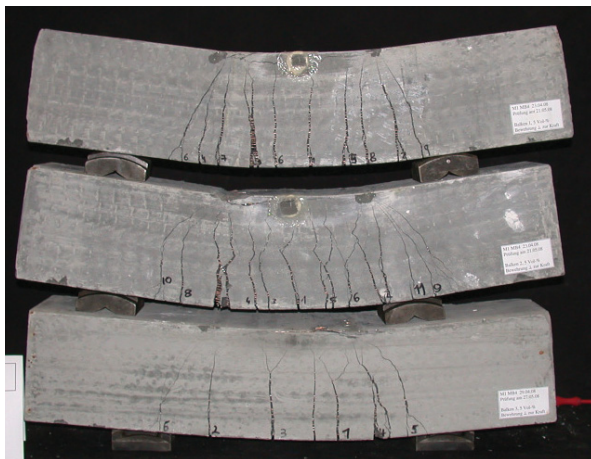


9 Risse

25 Risse

18 Risse

Abbildung 3.45: Rissanzahl der Balken MB1-5,1-51-h bis 53-h



13 Risse

16 Risse

9 Risse

Abbildung 3.46: Rissanzahl der Balken MB4-4,7-57-h bis 59-h

Es fällt auf, dass die Rissanzahl einer relativ großen Streuung unterworfen ist. Ein Grund hierfür liegt in der durch das Rütteln verschobenen Lage der einzelnen Bewehrungsmatten (Abbildung 3.34) und damit auch unterschiedlicher Betonüberdeckung. Ein anderer Grund ist, dass die Querdrähte der Matten nicht in allen Balken exakt übereinander lagen, sondern zum Teil einen Versatz aufwiesen. Eine Kombination dieser Faktoren trat zum Teil ebenfalls auf. Bei Betrachtung des Mittelwertes der Rissanzahl für die Balken mit MB1 (Abbildung 3.45) ergeben sich 17,3 und für jene mit MB4 (Abbildung 3.46) 12,7 Risse über die Balkenlänge. Damit wird grundsätzlich gezeigt, dass für annähernd gleiche Stahlgehalte, eine Verwendung kleinerer Maschenweiten zu einer höheren Rissanzahl führt. Geringere Rissabstände und eine höhere Rissanzahl führen zu einer Reduktion der Rissbreiten. Allerdings ist aus den experimentellen Un-

tersuchungen ersichtlich, dass eine Beeinflussung des Rissabstandes einen hohen Mikrobewehrungsgehalt erfordert. Anderenfalls versagen die Biegebalken bereits vor dem Stadium der ausgeprägten Mehrfachrissbildung. Am Beispiel der Balken mit einem Mikrobewehrungsgehalt von 6,1 Vol.-% wird die Abhängigkeit des Rissabstandes von der Maschenweite besonders deutlich (Abbildung 3.47). Bei diesen Balken entsprechen die Abstände der Risse den Abständen der Querstäbe.

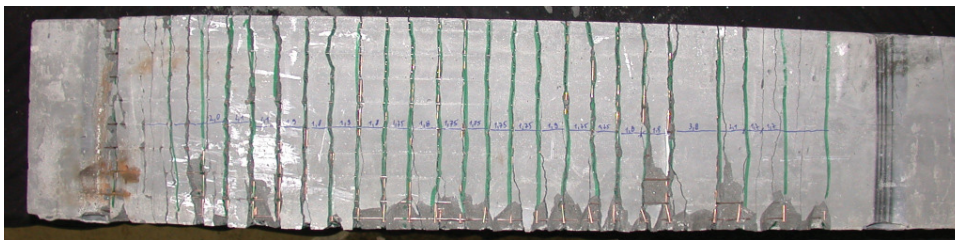


Abbildung 3.47: Untersicht Probe MB3-6,1-56-h mit Kennzeichnung der Rissabstände und Maschenweite

Für einen Einbau der Matten in vertikaler Richtung ist diese Abhängigkeit des Rissabstandes von der Maschenweite gleichermaßen vorhanden. In Abbildung 3.48 ist die Probe MB3-6,1-55-v mit am unteren Rand freigelegter Mikrobewehrung dargestellt und der Einfluss der Maschenweite auf die Rissabstände zweifelsfrei auszumachen.

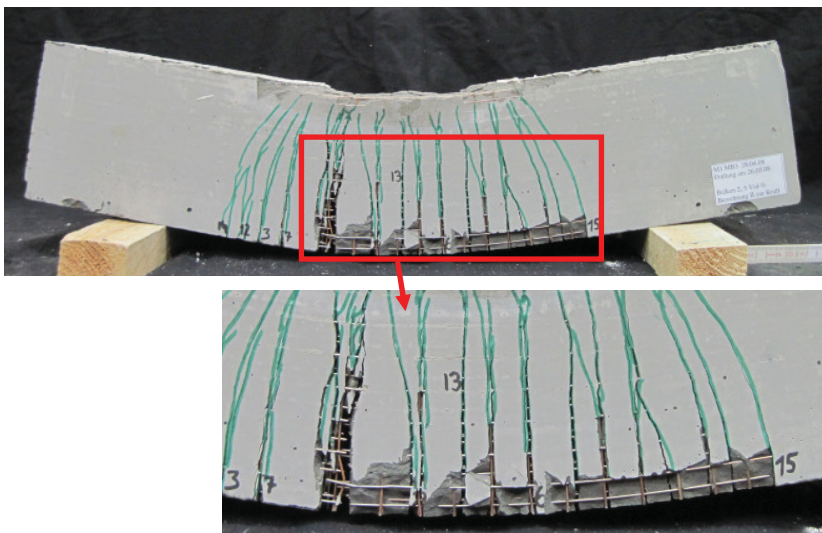


Abbildung 3.48: Ansicht Probe MB3-6,1-55-v und Detail der Risse und Querdrähte

Durch die Variation der Maschenweite wird ebenfalls der Abstand der Mikrobewehrungsmatten untereinander sowie die Betonüberdeckung beeinflusst. Zwar besitzt diese einen Einfluss auf die Rissbildung, für die verwendeten Stahlgehalte von mindestens 2,4 Vol.-% überwiegt jedoch der Einfluss des Abstandes der "Störstellen" (Maschenweite) gegenüber einer, um wenige Millimeter, verschobenen Betonüberdeckung.

c) Variation des Mikrobewehrungsdrahtdurchmessers

Zunächst führt, wie im Fall der Variation der Maschenweite, eine Veränderung des Drahtdurchmessers bei gleichbleibender Maschenweite und konstantem Stahlgehalt zu einer Veränderung der Mikrobewehrungsmattenanzahl und deren Abständen untereinander. Wie bereits geschildert, besitzt bei den vorliegenden Stahlgehalten die Mattenanzahl einen untergeordneten Effekt bzgl. der Rissbildung.

Einen direkten Vergleich zweier unterschiedlicher Mikrobewehrungsdurchmesser liefern Untersuchungen an Balken mit den Mikrobewehrungstypen MB4 (\emptyset 1,5 mm) und MB5 (\emptyset 2,0 mm). Beide besitzen eine lichte Maschenweite von 20 mm, der Durchmesser unterscheidet sich um 0,5 mm. Aus den bekannten Zusammenhängen im Stahlbetonbau bzgl. Rissbreite, Rissabstand und Stabdurchmesser wird erwartet, dass geringere Drahtdurchmesser im UHPC zu einer feineren Rissverteilung infolge geringerer Spannungen der Einzeldrähte führen. Ein Unterschied der Rissbilder wird insbesondere bei einem hohen Stahlgehalt der Balken erwartet. Bei einem Vergleich der Rissbilder der Proben MB4-4,7-57-v bis 59-v (Abbildung 3.49) mit denen der Proben MB5-5,4-60-v bis 62-v (Abbildung 3.50) zeigt sich jedoch im konstant biegebeanspruchten Bereich ($l_{M, \text{const}}$) für beide Balken eine identische Rissanzahl. Bei beiden Serien entspricht die Rissanzahl der Anzahl an Querdrähten im rein biegebeanspruchten Bereich, unabhängig vom Durchmesser der Drähte. Aufgrund des knapp 15 % größeren Stahlgehaltes der Proben der Serie MB5 gegenüber der Serie MB4 ergibt sich für die Serie MB5 über die gesamte Balkenlänge (l_{ges}) eine insgesamt größere Rissanzahl.

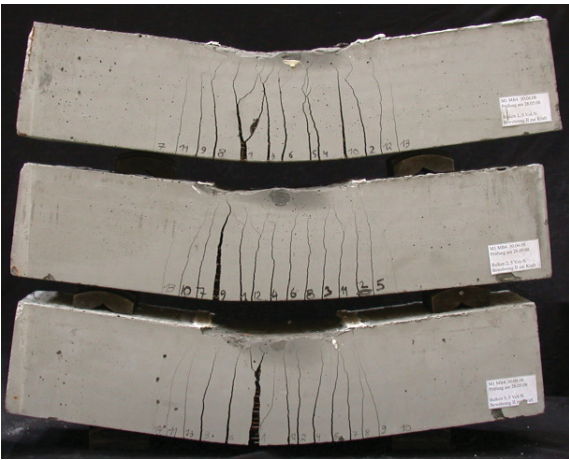


Abbildung 3.49: Rissanzahl der Balken MB4-4,7-57-v bis 59-v

Rissanzahl	
l_{ges}	$l_{M,const}$
13	10
14	10
14	10

Damit besitzt die Maschenweite einen deutlich stärkeren Einfluss auf die Rissbildung als der Mikrobewehrungsdrahtdurchmesser. Der Grund hierfür liegt in dem starren Verbund der Mikrobewehrung in den Kreuzungspunkten der Längs- und Querdrähte (Kapitel 3.3). Der im Stahlbetonbau gültige Zusammenhang zwischen Rissabständen und Durchmesser besitzt aufgrund der regelmäßigen Querdrähte für mikrobewehrten UHPC keine Gültigkeit.

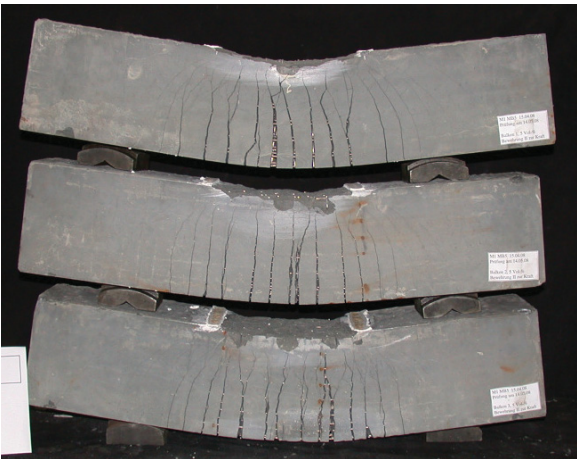


Abbildung 3.50: Rissanzahl der Balken MB5-5,4-60-v bis 62-v

Rissanzahl	
l_{ges}	$l_{M,const}$
20	10
17	10
18	10

d) Variation des Mikrobewehrungsgehaltes

Wie in den vorangegangenen Absätzen a) bis c) geschildert, bedarf es unter Verwendung der vorliegenden Stahlgüte (S235) eines hohen Mikrobewehrungsgehaltes (um 5 Vol.-%), um das Stadium der Mehrfachrissbildung zu erreichen und die Vorteile einer gleichmäßigen Rissverteilung durch die Querdrähte nutzen zu können. In diesem Fall weist die Kraft-Verformungs-Linie ein ausgeprägtes plastisches Plateau auf. Die große Verformungsfähigkeit mit Durchbiegungen in der Größenordnung um 20 mm (= 1/30 der Stützweite) resultiert aus der Mehrfachrissbildung bzw. den geringen Rissabständen im Abstand der Maschenweite.

Für alle Balken mit geringem Stahlgehalt (um 2,5 Vol.-%) entsteht nach Bildung von 2-3 Rissen im Bereich des konstanten Momentes (unabhängig von der Ausrichtung der Mikrobewehrungsmatten) eine Risslokalisierung und ein Reißen der Mikrobewehrungsdrähte mit Einschnürung der Druckzone. Wie im Stahlbetonbau führt eine massive Verstärkung der Zugkomponente durch Erhöhung des Stahlgehaltes auch bei mikrobewehrtem UHPC zu einem Versagen der Druckzone, wobei die Versagensszenarien abhängig sind von der Ausrichtung der Mikrobewehrung (siehe a) Variation der Mikrobewehrungsausrichtung).

In Abbildung 3.33 sind jeweils die einfachen und verdoppelten Mikrobewehrungsgehalte gemeinsam in einem Diagramm dargestellt. Ein Vergleich der Maximalkräfte (vgl. auch Tabelle 3.8) ergibt, dass eine Verdopplung des Mikrobewehrungsgehaltes zu einem um den Faktor 1,78 erhöhten Tragwiderstand führt.

3.6.5 Duktilität

Der Begriff „Duktilität“ bezeichnet die plastische Verformungsfähigkeit eines Materials. Eine sichere Anwendung von Baustoffen setzt deren ausreichende Duktilität voraus. Nur dann, wenn sich ein Versagen durch Verformungen und Rissbildungsprozesse ankündigt, anstatt schlagartig aufzutreten, wird im Stahl- und Spannbetonbau von einem duktilen Verhalten gesprochen.

Zur Bewertung der Duktilität von mikro- und faserbewehrtem UHPC werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit insgesamt 16 hohe, kurze Balken geprüft, wobei jeweils acht mit einer Faserbewehrung bzw. einer Mikrobewehrung und mit einem Stahlgehalt

von jeweils 2,4 Vol.-% versehen sind. Von den jeweils acht Balken erhalten vier am unteren Probekörperrand einen Sägeschnitt mit einer Tiefe von 10 mm.

Gekerbte Balken

Die Kerbung am unteren Probekörperrand ermöglicht die Untersuchung des lokalen Biegetragverhaltens in einem Einzerriss. Die Abmessungen sowie der Versuchsaufbau sind in Abbildung 3.51 dargestellt. Neben drei horizontalen Messstellen, zwei beidseitig am unteren Rand (l_{01} und l_{02}) der Probe und eine in Probekörpermitte (l_{03}), zur Aufzeichnung der Dehnung bzw. Rissbreite, wird zusätzlich die Durchbiegung in Balkenmitte (δ) erfasst. Auf diese Weise wird kontinuierlich das Trag- und Verformungsverhalten über den gesamten Kraftverlauf lokal in einem Einzerriss verfolgt.

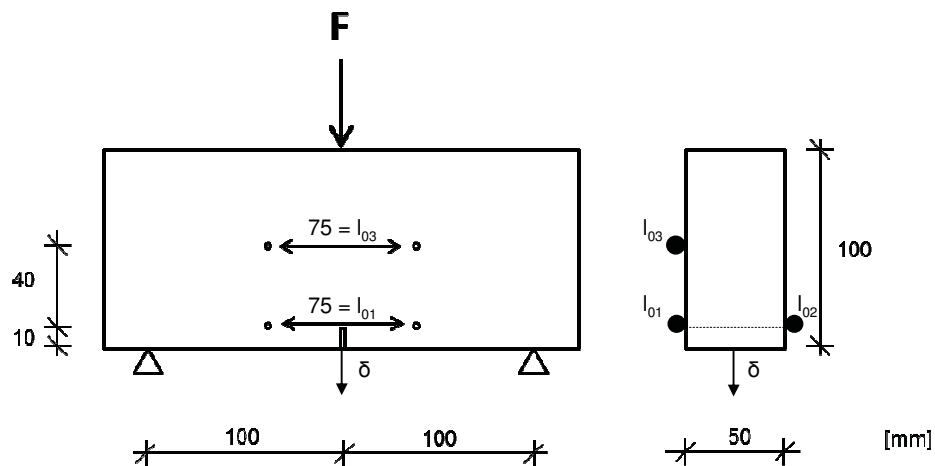


Abbildung 3.51: Versuchsaufbau kurzer hoher Balken, $b/h = 0,5$, selbst entwickelt

Anhand der Kraft-Rissöffnungs-Beziehung der gekerbten Balken (Abbildung 3.52) lassen sich grundsätzliche Unterschiede im Tragverhalten von mikro- bzw. faserbewehrtem UHPC erklären.

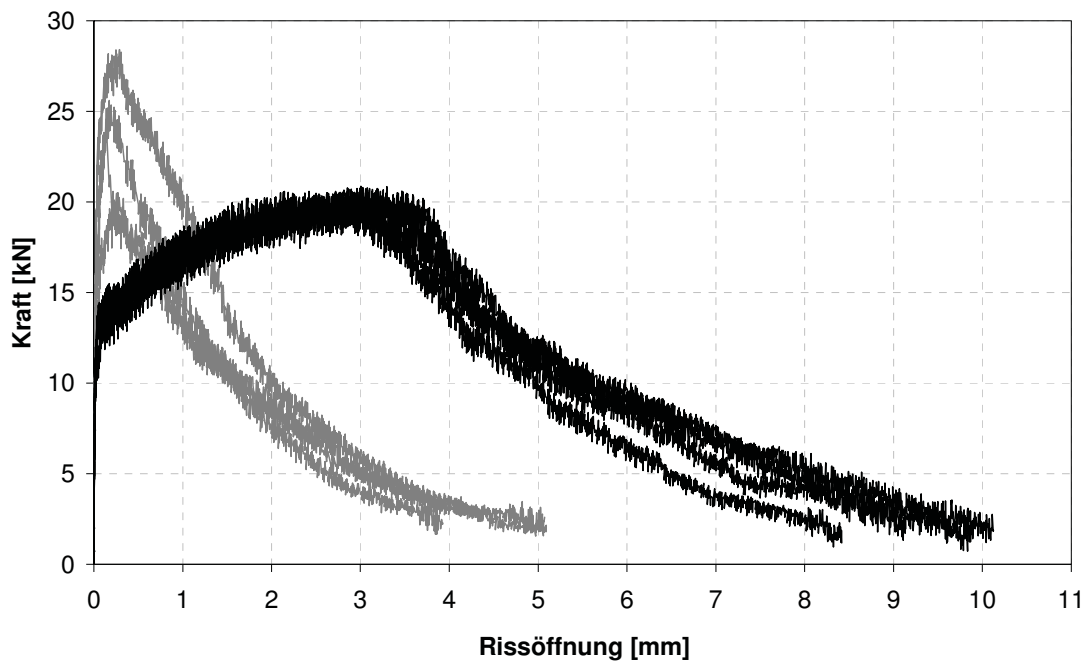


Abbildung 3.52: Kraft-Rissöffnungs-Beziehung gekerbter Balken, faserbewehrt (grau) u. mikrobewehrt (schwarz), jeweils vier Proben, Mittelwerte l_{01} und l_{02}

Die initiale Steifigkeit während der Rissöffnung ist für faserbewehrte Proben bei günstiger Faserausrichtung deutlich ausgeprägter als für mikrobewehrte Proben. Innerhalb kleiner Rissöffnungen steigt die aufnehmbare Kraft faserbewehrter Proben stark an, während die aufnehmbare Kraft der mikrobewehrten Balken bei kleinen Rissöffnungen nahezu stagniert. Erst mit ansteigender Rissöffnung und Dehnung der Mikrobewehrung folgt ein Kraftanstieg gemäß der Spannungs-Dehnungs-Beziehung der Mikrobewehrung. Die maximal aufnehmbare Kraft beträgt hierbei im Mittel 20,8 kN. Die geringe Fließgrenze der Mikrobewehrung ist verantwortlich dafür, dass der Kraftanstieg zu Beginn der Rissöffnung eine geringe Steigung aufweist. Während das Versagen durch Erreichen der Tragfähigkeit der Mikrobewehrung eintritt, erfolgt das Versagen faserbewehrter Proben durch einen Auszug der Fasern. Beide Versagensprozesse lassen sich als duktil beschreiben.

Unter der Voraussetzung, dass die Energie, die notwendig ist, um ein Versagen der Balken zu erreichen, ein Maß für die Duktilität ist, können beide Bewehrungsarten hinsichtlich ihrer Duktilität miteinander verglichen werden. Die Energie lässt sich dabei über das Integral der in Abbildung 3.52 angegebenen Beziehungen bestimmen. Da die Arbeitslinie nicht bis zu einem vollständigen Traglastverlust aufgezeichnet ist, dient

jeweils eine Kraft von 1/10 der Maximallast jeder Einzelkurve als Grenzwert. Für faserbewehrte Proben ergibt sich ein mittlerer Wert (aus vier Proben) von 1,81 kNmm, während der Mittelwert für vier mikrobewehrte Proben bei 4,37 kNmm liegt, was mehr als der doppelten Energieaufnahmekapazität faserbewehrter Proben entspricht. Es ist jedoch zu beachten, dass diese hohe Duktilität mikrobewehrter Proben allein auf der gesteigerten Verformungsfähigkeit beruht. Zur Steigerung der Steifigkeit mikrobewehrter Proben bei kleinen Rissbreiten ist die Verwendung eines Stahls mit höherer Fließgrenze erforderlich.

Zu beachten ist, dass es sich im vorliegenden Fall, im Gegensatz zu den in Kapitel 3.6.2 bis 3.6.4 vorgestellten Untersuchungen zum globalen Tragverhalten, um die Betrachtung an einem lokalen Einzelriss handelt.

Ungekerbte Balken

Neben dem Arbeitsvermögen ist auch die Biege Zähigkeit ein Maß für die Duktilität bzw. Energieaufnahmekapazität von mikro- bzw. faserbewehrten Balken. In [WaLi90] ist zur Bestimmung der Duktilität faserbewehrter Balken der Biege Zähigkeitsindex T_{\max} eingeführt. Dieser wird über das Verhältnis

$$T_{\max} = \delta_{F_{\max}} / \delta_{F_{cr}} \quad (3.4)$$

bestimmt, wobei $\delta_{F_{\max}}$ die Durchbiegung bei Maximallast und $\delta_{F_{cr}}$ die Durchbiegung bei Erstrisskraft kennzeichnet. Um die Kraft beim Erstriss und damit die Biege Zähigkeit bestimmen zu können, sind Untersuchungen an ungekerbten Balken erforderlich. Der Versuchsaufbau entspricht bis auf die Kerbung dem in Abbildung 3.51 dargestellten Aufbau. In Abbildung 3.53 sind die Kraft-Durchbiegungs-Kurven zur Bestimmung der Biege Zähigkeit mikro- und faserbewehrter Proben gegenübergestellt.

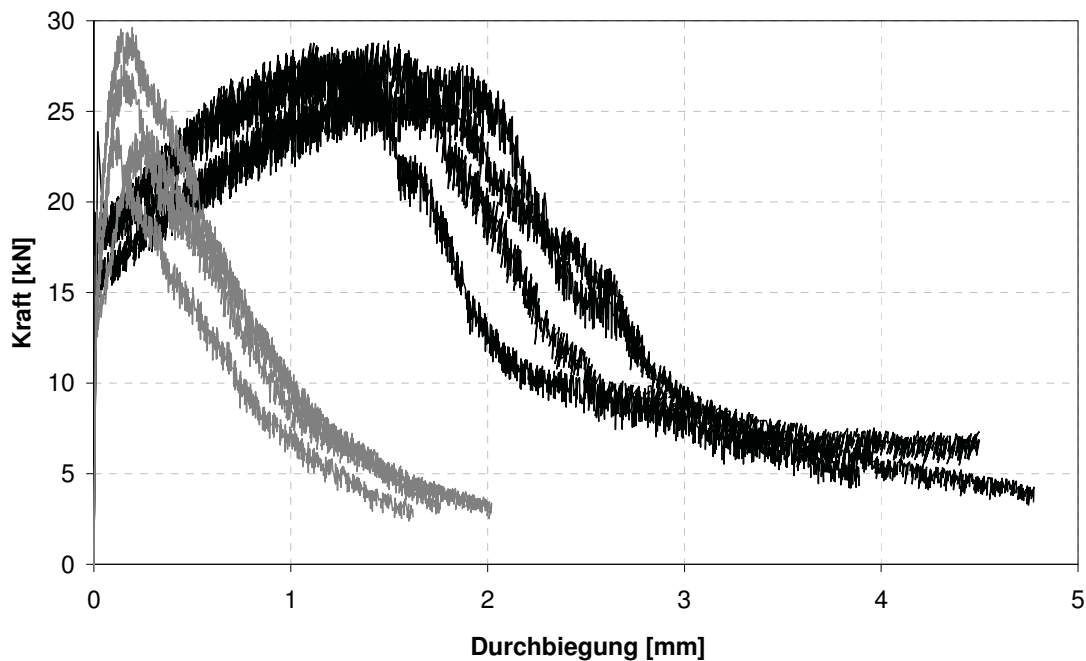


Abbildung 3.53: Kraft-Durchbiegungs-Beziehung ungekerbter Balken, faserbewehrt (grau) und mikrobewehrt (schwarz), jeweils vier Proben

Die zugehörigen mittleren Biegezugfähigkeiten T_{\max} betragen für vier faserbewehrte Balken $T_{\max,F} = 14,7$ [-] und für vier mikrobewehrte Balken $T_{\max,MB} = 105,0$ [-]. Aufgrund der vergleichsweise hohen Durchbiegung mikrobewehrter Balken, weisen diese entsprechend hohe Biegezugfähigkeiten auf.

Aus den vorgestellten Untersuchungen ist ersichtlich, dass eine Bewertung der Duktilität je nach Definition und Berechnungsvorschrift dazu führt, dass mikrobewehrter UHPC bei gleichem Stahlanteil die zwei- bis siebenfache Energieaufnahmekapazität im Vergleich zu faserbewehrtem UHPC besitzt.

3.6.6 Fazit

Hinsichtlich der Biegetragfähigkeit kann eine Mikrobewehrung bei gleichem Stahlgehalt zu vergleichbaren Ergebnissen führen wie Stahlfasern. Ein deutlicher Unterschied liegt jedoch im Verfestigungs- sowie Entfestigungszustand. Während eine Faserbewehrung zu einem raschen Kraftanstieg und damit einer steilen Verfestigungsfunktion führt,

resultiert aus Verwendung der Mikrobewehrung (aus S235) ein deutlich weiches Verfestigungsverhalten. Damit ist die maximal aufnehmbare Kraft faserbewehrter Balken bereits bei geringen Verformungen bzw. Rissbreiten erreicht und der Entfestigungszustand eingeleitet. Genau wie im Fall der zentrischen Zugversuche ist das Verhalten unter einer Biegebeanspruchung durch einen exponentiellen Abfall der Kraft-Verformungs-Linie bzw. Kraft-Rissöffnungs-Beziehung gekennzeichnet. Ein kontinuierliches Ausziehen der Fasern aus der Matrix kann bei gleichmäßiger Verteilung der Fasern und günstiger Ausrichtung innerhalb des Querschnitts ein duktiles Versagen gewährleisten. Mikrobewehrte Proben zeigen ebenfalls ein hohes Maß an Duktilität, das vor allem in der enormen Verformungsfähigkeit begründet liegt.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen mikro- und faserbewehrten Biegebalken liegt in der Rissanzahl. Während die in Kapitel 3.6.3 vorgestellten faserbewehrten Balken nur einen einzigen Riss aufweisen, liegt die mittlere Rissanzahl mikrobewehrter Balken (MB1) (Kapitel 3.6.4) bei 2,5. Weiterhin erfolgt die Lokalisierung des versagenbestimmenden Risses bei mikrobewehrten Balken bei deutlich größeren Verformungen im Vergleich zu stahlfaserbewehrten Balken. Der Grund für die größere Rissanzahl sowie die höhere Verformungsfähigkeit mikrobewehrter gegenüber faserbewehrter Balken ist das unterschiedliche Verbundverhalten beider Bewehrungsarten.

Die Nachrissbiegezugfestigkeiten von faser- und mikrobewehrtem UHPC unterscheiden sich bedingt durch das Verbundverhalten und die unterschiedliche Festigkeit von Fasern und Mikrobewehrung entsprechend voneinander (Tabelle 3.9). Während stahlfaserbewehrter UHPC zu Beginn eine vergleichsweise hohe Nachrissbiegezugfestigkeit $f_{\text{cfm},L1}$ aufweist, beträgt die Nachrissbiegezugfestigkeit stahlfaserbewehrter Balken für eine Mittendurchbiegung von $\delta_{L2} = 3,5$ mm nur noch ca. 25 % der Festigkeit mikrobewehrter Balken.

Tabelle 3.9: Nachrissbiegezugfestigkeiten [N/mm²] unterschiedlich bewehrter Balken

Bewehrungstyp	$f_{\text{cfm},L1}$	$f_{\text{cfm},L2}$
faserbewehrt (2,4 Vol.-%))	14,44	3,29
mikrobewehrt - h (2,6 Vol.-%)	10,40	9,40
mikrobewehrt - v (2,6 Vol.-%)	9,74	10,20

Anhand von Tabelle 3.9 wird deutlich, dass die beiden unterschiedlichen Bewehrungstypen Mikrodrahtfasern und Mikrobewehrung das Trag- und Verformungsverhalten der UHPC-Balken entscheidend beeinflussen. Eine Bewertung des Biegetragverhaltens und der Nachrissfestigkeit über den im Sachstandsbericht für UHPC [Schm08] vorgeschlagenen Ansatz, beruhend auf der Richtlinie für Stahlfaserbeton [RStf10], kann für mikrobewehrten UHPC nicht angewendet werden, da dieser dem veränderten Tragverhalten und der ausgeprägten Verformungsfähigkeit durch den Einsatz einer Mikrobewehrung nicht gerecht wird. In Kapitel 6 wird daher beruhend auf den Erkenntnissen der experimentellen Untersuchungen aus Kapitel 3, analytischen Untersuchungen aus Kapitel 4 und numerischen Analysen aus Kapitel 5 ein Modell zur Berücksichtigung der Mikrobewehrung in UHPC vorgestellt.

Durch die Untersuchung von 48 Biegebalken (16 Serien) mit Variationen von Maschenweite, Mikrobewehrungsausrichtung, Mikrobewehrungsdrahtdurchmesser und Stahlgehalte wurden die maßgeblichen Einflussfaktoren auf das Tragverhalten eruiert. Es wurde die Abhängigkeit der Rissbildung von der Maschenweite festgestellt, und, dass der Einfluss des Drahtdurchmessers aufgrund der vorliegenden Verbundeigenschaften vernachlässigbar bzgl. der Rissbildung ist. Durch gezielte Ausrichtung der Mikrobewehrungsmatten (vertikal oder horizontal) lässt sich zudem die Steifigkeit im Bereich geringer Durchbiegungen gezielt steuern. Daneben wurde festgestellt, dass die Mikrobewehrung in der Druckzone bei horizontaler Bewehrungsanordnung unter zu großer Beanspruchung, ähnlich wie im zentrischen Druckversuch für eine Anordnung nach Abbildung 3.11, ausknickt. Eine Erhöhung der Druckfestigkeit des unbewehrten UHPC durch Behinderung der Querdehnung, wie im zentrischen Druckversuch bei günstiger Bewehrungsanordnung nach Abbildung 3.10, ergibt sich weder für eine vertikale noch horizontale Mikrobewehrungsausrichtung.

Alle Last-Verformungs-Kurven der mikrobewehrten Balken (Abbildung 3.33) weisen ein langes, ansteigendes Lastplateau auf, womit sich das Last-Verformungs-Verhalten wesentlich von demjenigen der faserbewehrten Proben unterscheidet.

3.7 Dauerhaftigkeit

3.7.1 Allgemeines

Aufgrund seines dichten Gefüges und der geringen Porosität besitzt UHPC einen hohen Widerstand gegen chemische und physikalische Angriffe [Schm08, MüS11]. Die hohe Festigkeit sorgt zudem dafür, dass UHPC unempfindlicher gegenüber Abrasionseinwirkungen durch hohe mechanische Beanspruchungen ist. Als Folge dieser Eigenschaften wird für Bauteile aus UHPC von einer erhöhten Dauerhaftigkeit ausgegangen.

Unter der Bedingung, dass Stahlfasern zum Einsatz kommen, wird in der Regel vorausgesetzt, dass diese zumindest keinen nachteiligen Einfluss auf die Dauerhaftigkeitseigenschaften von UHPC haben [Leu07]. Nach [SMü12] verbessern Fasern innerhalb der UHPC-Matrix zwar den Widerstand gegenüber chemischem (saurem) Angriff, gegenüber Chloridangriffen schnitt die in [SMü12] untersuchte faserbewehrte Mischung jedoch schlechter ab als die unbewehrte UHPC Mischung. [SMü12] zeigten, dass die Faserübergangszone (Faser/Matrix) eine Schwächung des umgebenden dichten Gefüges darstellt und der Anteil an Kapillarporen im Vergleich zu unbewehrtem UHPC ansteigt.

Zudem kann das Erscheinungsbild von Sichtbetonflächen unter dem Einsatz der Stahlfasern aufgrund oberflächennaher Fasern unter Korrosionsflecken leiden, ebenso wie die Oberflächenbeschaffenheit, sodass üblicherweise Schutzanstriche verwendet werden. UHPC mit Mikrobewehrung weist demgegenüber den wesentlichen Vorteil einer möglichen Betondeckung auf, eine Beschichtung ist daher nicht erforderlich. Für Ferrocement hingegen, bei dem ebenfalls eine Art Betondeckung realisiert werden kann, wird aufgrund der im Vergleich zu UHPC minderwertigen Qualität des verwendeten Mörtels und damit höheren Durchlässigkeit eine Schutzschicht oder die Verwendung eines nichtrostenden Stahls empfohlen [FC20].

Jedoch schaden nicht allein die Korrosionsflecken dem Erscheinungsbild von faserbewehrtem UHPC. Unter Frost-Taumittelangriff wurde von [PaSe08] gezeigt, dass Fasern, die senkrecht zur beanspruchten Prüfoberfläche liegen zwischen der abgewitterten Zementleimschicht „stachelartig“ an der Oberfläche herausstehen. Unter Verwendung von Stahlfasern ist daher in jedem Fall eine Oberflächenbehandlung erforderlich.

Am Beispiel des CDF-Tests (Capillary suction of Deicing solution and Freeze-Thaw-test) wird in Kapitel 3.7.2 der positive Effekt der Verwendung einer Mikrobewehrung

bezüglich der Dauerhaftigkeit sowie des Erscheinungsbildes und der Oberflächenbeschaffenheit vorgestellt.

3.7.2 CDF-Test

Allgemeines

Der CDF-Test, der an der Universität Duisburg-Essen entwickelt wurde, stellt eine international anerkannte und genormte [SeFaJa96, DIN12390-9] Prüfung zur Bestimmung des Frost-Tausalzwerstandes dar. Die Probekörper werden dabei einem zwölfstündigen Temperaturzyklus in den Grenzen von $+20\text{ °C}$ bis -20 °C ausgesetzt. Die in der Frosttruhe innerhalb eines separaten Behälters befindlichen Proben werden mit der Prüffläche in eine Prüflösung (3 % NaCl, 97 % demineralisiertes Wasser) eingetaucht. Der Ablauf eines Temperaturzyklusses sowie die im Rahmen des Tests durchzuführenden einzelnen Untersuchungen sind in Abbildung 3.54 dargestellt.

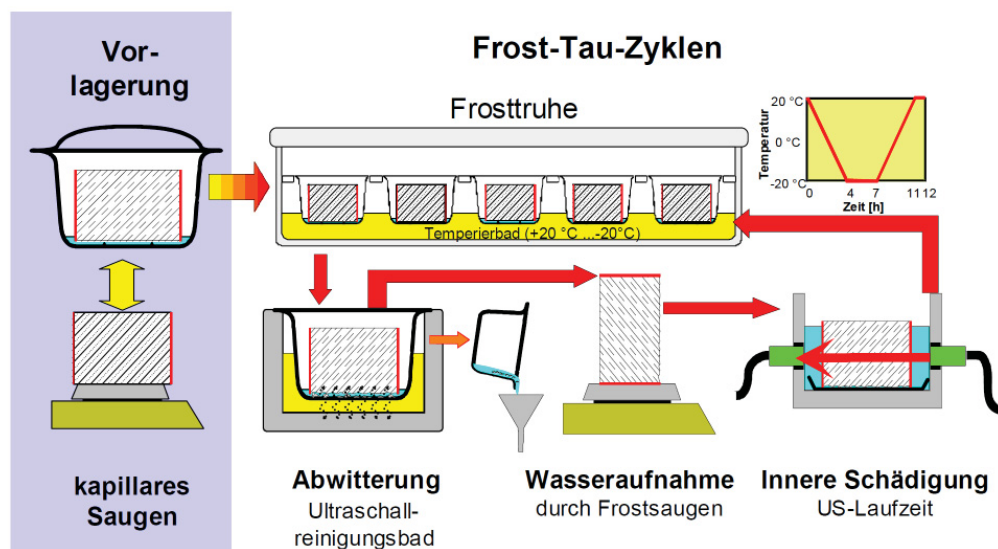


Abbildung 3.54: Untersuchungen und Ablaufschema im CDF-Test (Darstellung hier mit Ultraschalllaufzeit zur Bestimmung der inneren Schädigung anstelle der Resonanzfrequenz) [Se06]

Bevor die Proben mehreren Frost-Tau-Zyklen ausgesetzt werden, ist ein siebentägiges kapillares Saugen vorgesehen. Die Gewichtszunahme während des Saugens wird dabei regelmäßig gemessen.

Ein Maß für die Schädigung infolge Frost-Tausalzbeanspruchung ist die Bestimmung der Abwitterung. Im CDF-Test wird die Summe der abgewitterten Partikel nach 28 Frost-Tau-Wechseln (FTW) einem Grenzwert von 1500 g/m² gegenübergestellt.

Zur Beurteilung der inneren Schädigung wird innerhalb des CDF-Tests die Untersuchung des relativen dynamischen E-Moduls herangezogen. Dieser wird dabei entweder über die Ultraschalllaufzeit oder die Resonanzfrequenz bestimmt. Ein Abfall des relativen dynamischen E-Moduls auf 80 % kennzeichnet eine vorhandene innere Gefügeschädigung.

Durchgeführte Untersuchungen

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden lediglich Untersuchungen an mikrobewehrten UHPC-Proben durchgeführt. Um einen Vergleich zu faserbewehrten Proben zu liefern wird auf die Ergebnisse aus [PaSe08] zurückgegriffen, da hier die der Mischung M1-F sehr ähnliche Mischung M2Q [FeSc05] verwendet wurde.

Der Widerstand gegen Frost-Taumittelbeanspruchung wird an insgesamt 15 mikrobewehrten Proben untersucht. Neben dem Vergleich zu faserbewehrten Proben soll der Einfluss der Betondeckung der Mikrobewehrung geklärt werden. Daher werden drei Serien (CDF-0 / CDF-1 / CDF-2) mit jeweils fünf Probekörpern hinsichtlich der Betondeckung (0 / 5 / 10 mm) unterschieden, wobei für die Serie CDF-0 die Mikrobewehrung lediglich mit einer im μm -Bereich dünnen Zementleimschicht überdeckt ist. Die 110 mm x 150 mm x 70 mm großen Prüfkörper werden aus Würfeln der Kantenlänge 150 mm hergestellt. Pro Würfel ergeben sich eine Probe sowie eine Rückstellprobe. Gemäß [SeFaJa96] werden die Prüfflächen jeweils gegen eine Teflonscheibe betoniert (Abbildung 3.55), um eine trennmittelfreie, unbehandelte Oberfläche zu erhalten.

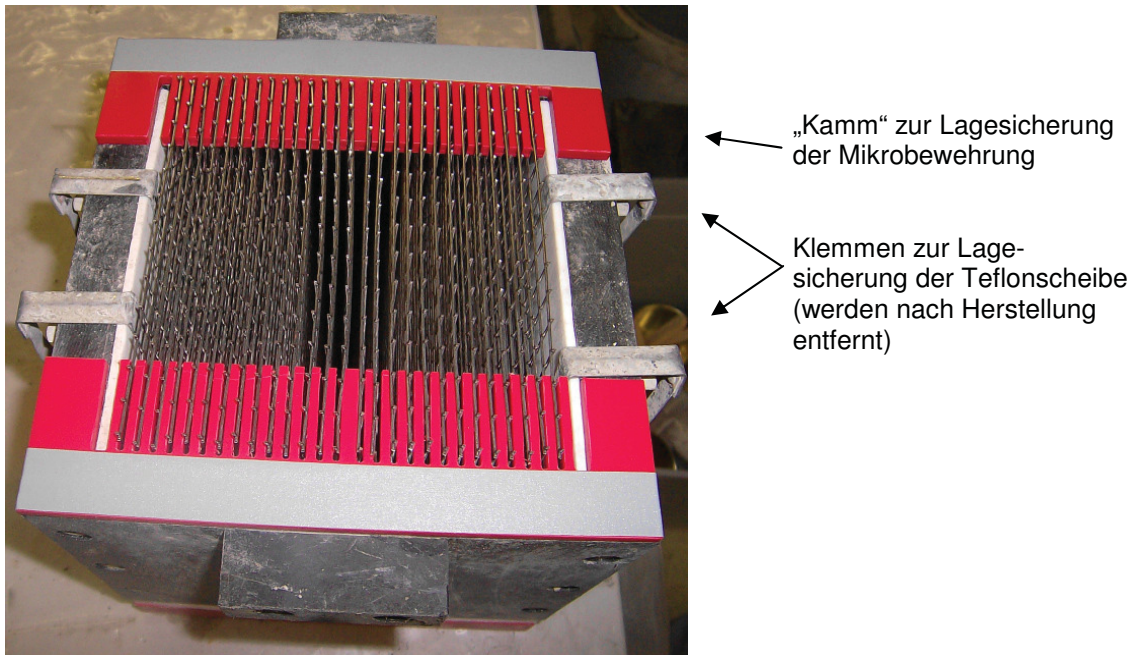


Abbildung 3.55: Herstellung der Proben für den CDF-Test (hier: 0 mm Betondeckung)

Die Lagerung der Proben erfolgt abweichend zu Kapitel 2.3.2 gemäß [SeFaJa96]. Nach der Herstellung verbleiben die Proben 24 Stunden in der Schalung, anschließend erfolgt eine sechstägige Wasserlagerung bei 20 °C und abschließend lagern die Proben zur Oberflächentrocknung 21 Tage im Klimaraum (20 °C, 65 % r. F.).

Ergebnisse

Die relative Feuchtaufnahme während des kapillaren Saugens ist für den mikrobewehrten UHPC aufgrund des dichten Gefüges vergleichsweise gering. Auch die Feuchtaufnahme nach 56 FTW ist im Vergleich zu Normalbeton mit maximal 0,21 % Feuchtaufnahme gering (Abbildung 3.56). Hinsichtlich der unterschiedlichen Betondeckung kann festgestellt werden, dass die Serie CDF-0 (ohne Betondeckung) nach der siebentägigen Vorlagerung eine Differenz in der Feuchtaufnahme von 0,03 M.-% zu den Proben mit Betondeckung aufweist, die im Verlauf der Frost-Tau-Zyklen erhalten bleibt. Begründet wird die höhere Feuchtaufnahme der Proben ohne Betondeckung mit der erhöhten Porosität in der Übergangszone zwischen Mikrobewehrung und Matrix direkt an der Prüfoberfläche.

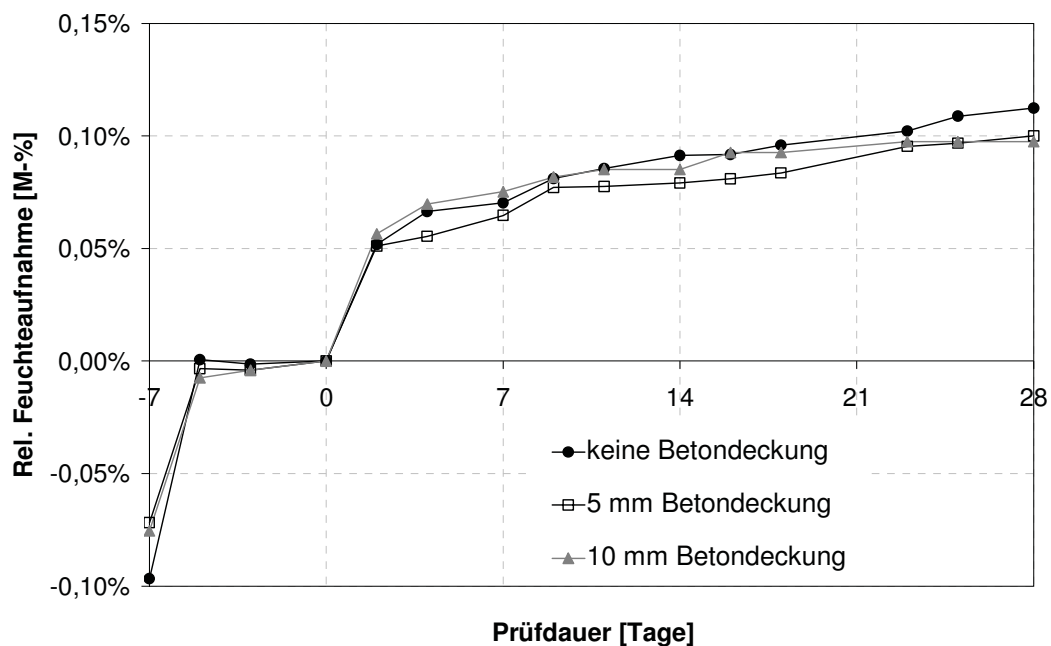


Abbildung 3.56: Relative Feuchtaufnahme mikrobewehrter Proben im CDF-Test (Mittelwerte)

Ein Vergleich zu den faserbewehrten Proben aus [PaSe08] zeigt, dass die relativen Feuchtaufnahmen mikrobewehrter Proben nach 28 Tagen mit mittleren 0,10 M.-% unterhalb derer faserbewehrter Proben mit 0,19 M.-% liegen. Das kapillare Saugen in-

nerhalb der ersten sieben Tage hingegen ist bei beiden Bewehrungsarten mit ca. 0,10 M.-% identisch.

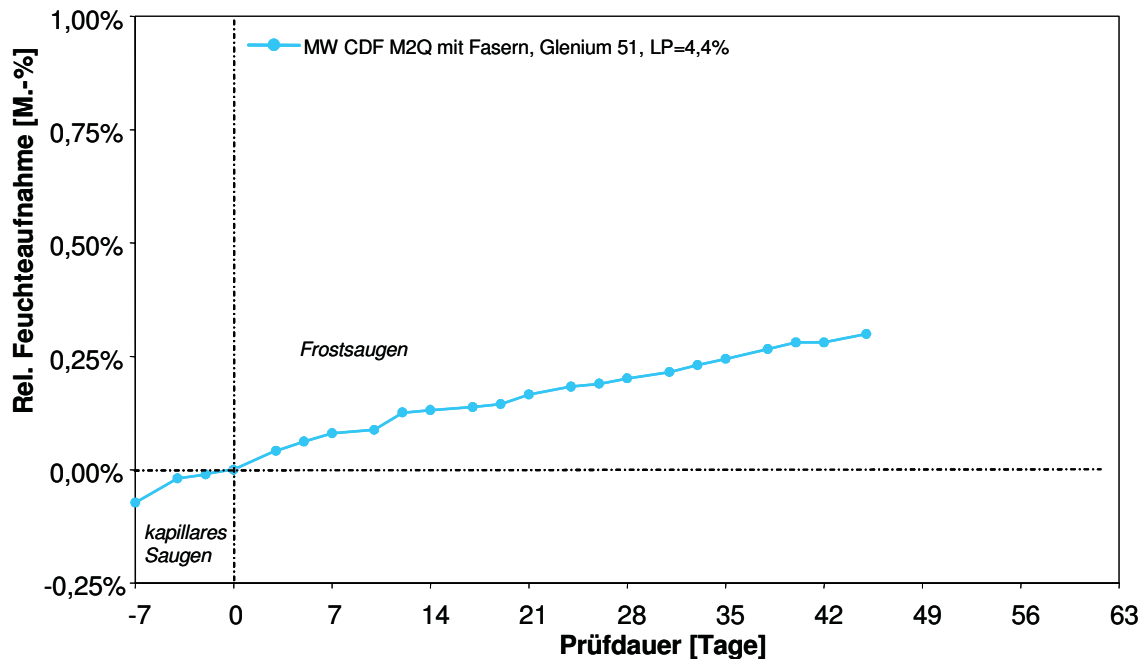


Abbildung 3.57: Relative Feuchteaufnahme faserbewehrter Proben im CDF-Test (Mittelwerte) [PaSe08]

Aufgrund der im Verlauf der Messungen festgestellten geringen Abwitterungen wird für den mikrobewehrten UHPC die Anzahl der FTW von üblicherweise 28 auf 56 verdoppelt. Die Verläufe der Abwitterungen für die drei unterschiedlichen Varianten der Betondeckung sind in Abbildung 3.58 dargestellt. Zwar liegen alle gemessenen Abwitterungen weit unterhalb der Schädigungsgrenze von 1500 g/m^2 . Es ist jedoch eine Abhängigkeit der Abwitterung von der Betondeckung auszumachen. Je mehr Betondeckung vorhanden ist, desto höher ist die Abwitterung.

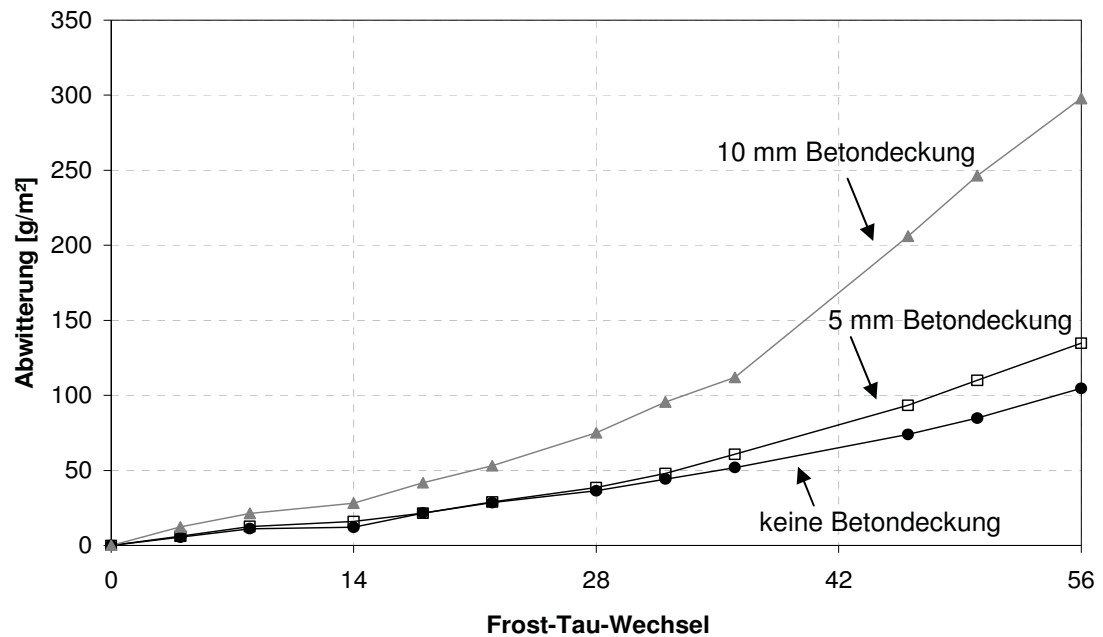


Abbildung 3.58: Abwitterung mikrobewehrter Proben im CDF-Test (Mittelwerte)

Ein Vergleich der Probekörperoberflächen nach 56 FTW ist in Abbildung 3.59 dargestellt. Während die Probe, die keine Betondeckung, bzw. eine dünne Zementleimschicht als Überdeckung aufweist, wie erwartet Korrosionsflecken zeigt, sind die Proben, bei denen eine Betondeckung von nur 5 bzw. 10 mm angeordnet wurde frei von Korrosionsprodukten. Rostfahnen, die in den Ecken der Probekörper vorhanden sind, resultieren aus unzureichender Abdichtung im Eckbereich und gehen daher nicht in die Betrachtung ein. Es kann beobachtet werden, dass je näher die Mikrobewehrung an der Probekörperoberfläche liegt, desto stärker der Zusammenhalt des umliegenden UHPC unter der Beanspruchung ist. Zudem ist eine Betondeckung des dichten UHPC von nur 5 mm bereits ausreichend, um Rostfahnen an der Oberfläche zu vermeiden.



Abbildung 3.59: Mikrobewehrte Mischung M1 nach 56 FTW, CDF-Test mit unterschiedlicher Betondeckung (0 / 5 / 10 mm, v. l. n. r.)

Die Abwitterungsmengen der faserbewehrten Mischung M2Q sind in Abbildung 3.60 aufgetragen. Die Mischung mit Fasern weist nach 56 Frost-Tau-Wechseln ebenfalls eine Abwitterungsmenge weit unterhalb der Schädigungsgrenze auf. Die faser- und mikrobewehrten Mischungen unterscheiden sich hinsichtlich des Frost-Taumittel-Widerstandes anhand der Betonüberdeckung der Mikrobewehrung. Während die Abwitterungsmenge für eine Überdeckung der Mikrobewehrung von 10 mm oberhalb der Abwitterungsmenge faserbewehrter Proben liegt, weisen die Proben mit einer Überdeckung von 5 mm deutlich geringere Abwitterungsmengen auf. Aus Gründen des Verbundes ist eine Mindestüberdeckung in der Größe des Drahtdurchmessers erforderlich, was im vorliegenden Fall einer Betondeckung von 1 mm entspricht. Resultierend aus den vorliegenden Untersuchungen wird vorgeschlagen, die Bewehrungsüberdeckung in der Größe des einfachen bis doppelten Drahtdurchmessers zu wählen.

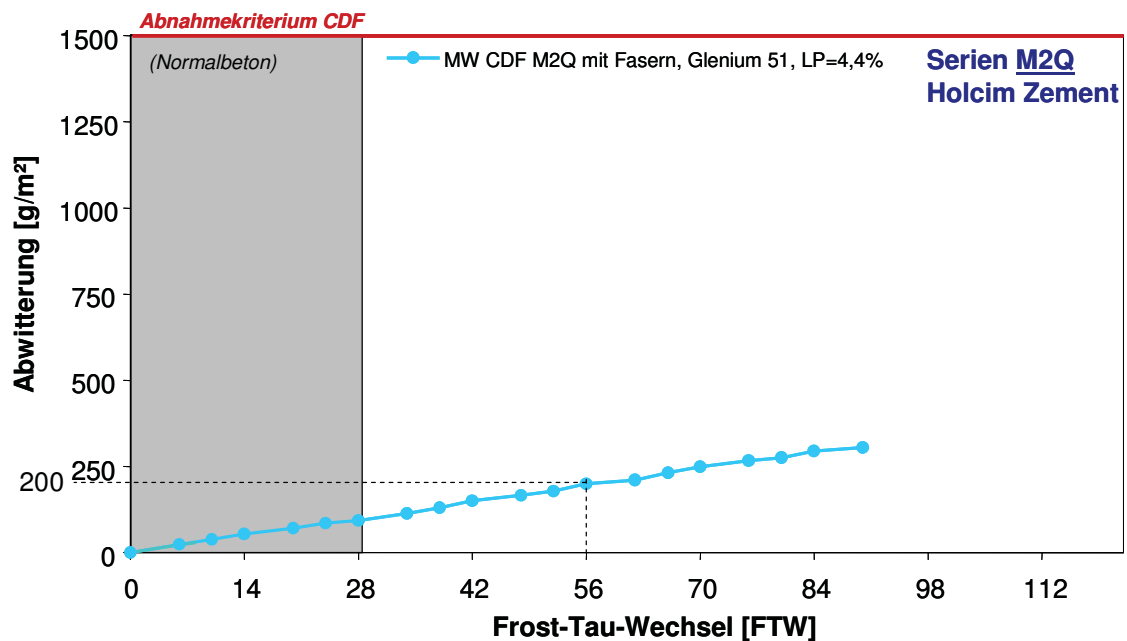


Abbildung 3.60: Abwitterung faserbewehrter Proben im CDF-Test (Mittelwerte)
[PaSe08]

Bei einem Vergleich der optischen Auswertung (Abbildung 3.59 und Abbildung 3.61) der Prüfflächen nach Durchführung des CDF-Tests sind allerdings erhebliche Unterschiede zwischen faser- und mikrobewehrter Mischung auszumachen. In Abbildung 3.61 sind einzelne, senkrecht zur Prüfoberfläche durch die Abwitterung der Zementleimschicht herausstehende, korrodierte Fasern zu erkennen. Weiterhin sind oberflächennahe Fasern parallel zur Prüfoberfläche ebenfalls korrodiert. Damit ist die faserbewehrte Mischung am ehesten mit der mikrobewehrten Mischung ohne Betondeckung zu vergleichen.

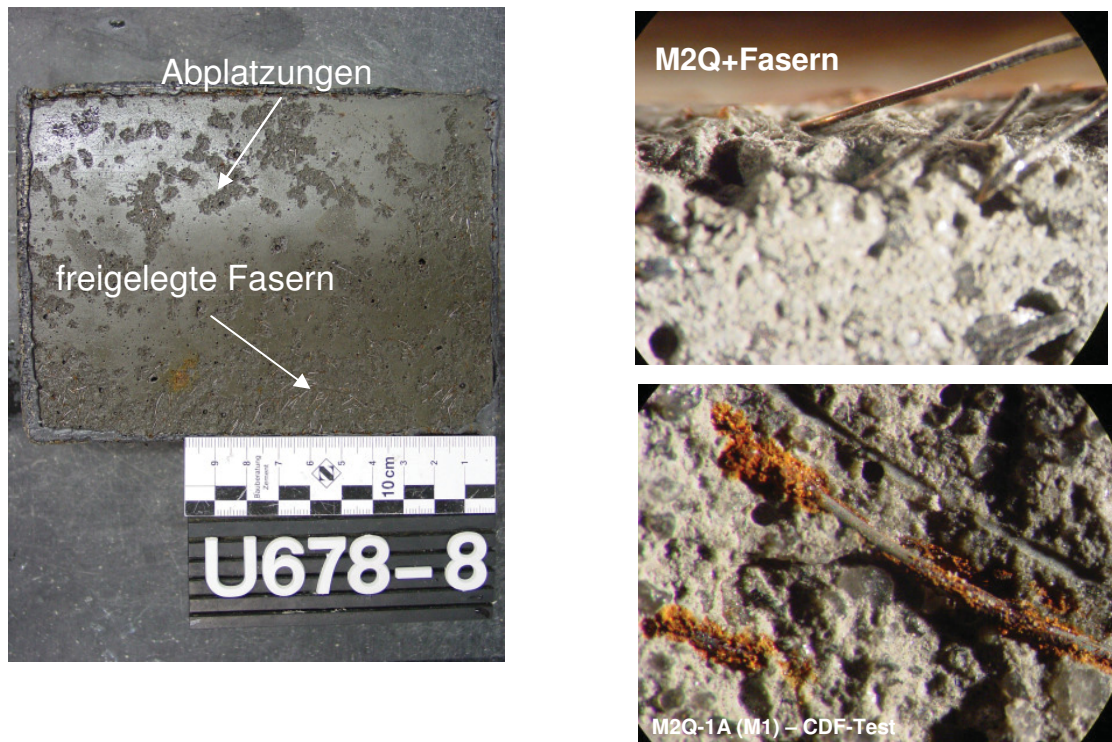


Abbildung 3.61: Mischung M2Q mit Fasern nach 56 FTW im CDF-Test unter dem Lichtmikroskop [PaSe08]

Die Untersuchungen zum dynamischen E-Modul liefern weder für die faser- noch die mikrobewehrte Mischung eine innere Schädigung. Die Messwerte liegen nach 56 FTW alle um 100 %. Für einige Proben wird sogar eine Erhöhung des relativen dynamischen E-Moduls festgestellt. Es ist anzunehmen, dass die Messung durch den vorhandenen Stahl in Form von Fasern bzw. Mikrobewehrung beeinflusst wird. Eine vorhandene innere Schädigung setzt einen Abfall des relativen dynamischen E-Moduls auf 80 % voraus, daher kann für die vorgestellten Proben davon ausgegangen werden, dass keine Gefügestörung infolge Frost-Taumittel-Angriff hervorgerufen wird. Dieser Umstand spiegelt sich auch in der Feuchteaufnahme während des CDF-Tests wider. Weder die mikro- noch die faserbewehrten Proben weisen eine hohe Feuchteaufnahme auf.

Für den Fall, dass der UHPC einer Wärmebehandlung oder sogar extremen thermischen Bedingungen unterzogen wird, können die Ergebnisse infolge der Mikrorissbildung durch starke Erwärmung der Proben deutlich von den hier präsentierten Ergebnissen abweichen [PaSe2008].

3.8 Fazit

Anhand der durchgeführten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Tragfähigkeits- und Dauerhaftigkeitseigenschaften von mikrobewehrtem UHPC mindestens mit denen von mikrodrahtfaserbewehrtem UHPC vergleichbar sind. Es ergeben sich hinsichtlich der Verformungsfähigkeit sogar Vorteile durch die Verwendung einer Mikrobewehrung aufgrund der ausgeprägten Plastifizierung dieser und damit im Vergleich zu faserbewehrtem UHPC deutlichen Steigerung der Duktilität. Die Maschenstruktur bedingt einen starren Verbund in den Kreuzungspunkten der Mikrobewehrung. Anders als glatte Mikrodrahtfasern (ohne Aufbiegung an den Enden), die bei ausreichend hoher Zugfestigkeit der Fasern aus der Matrix ausgezogen werden, verbleibt die Mikrobewehrung in den Kreuzungspunkten der Drähte im Beton. Lediglich die einzelnen Maschen erfahren durch die Belastung eine Verlängerung. Die guten Verbundeigenschaften stellen unter Voraussetzung eines ausreichenden Mikrobewehrungsgehaltes eine Mehrfachrissbildung sicher und gewährleisten damit indirekt geringe Rissbreiten. Sobald ein mikrobewehrter Querschnitt einer Zugbeanspruchung ausgesetzt ist, stellt ab Überschreiten der Betonzugfestigkeit die Mikrobewehrung den entscheidenden Anteil des Tragverhaltens von mikrobewehrtem UHPC dar. Die mechanischen Eigenschaften von mikrobewehrtem UHPC unter reiner Zugbeanspruchung sind daher maßgeblich abhängig von den Eigenschaften der Mikrobewehrung - Durchmesser, Maschenweite, Festigkeit - selbst. Nach Erstrissbildung ist die weitere Rissbildung abhängig von der Eigenschaft des UHPC-Mikrobewehrungs-Verbundes und damit vom Abstand der Querdrähte, da diese direkt die Verbundcharakteristik beeinflussen (siehe Kapitel 3.3).

Durch die gleichmäßige und gezielte Anordnung der Mikrobewehrung unterliegt die Tragfähigkeit mikrobewehrter Zug- und Biegezugproben geringeren Streuungen als diejenige faserbewehrter Proben, bei denen je nach Verteilung/Lage/Ausrichtung evtl. deutlich geringere Tragfähigkeiten im gerissenen Zustand resultieren.

Während der Einsatz von 2,4 Vol.-% Fasern zu keiner wesentlichen Steigerung der Zugfestigkeit führt, kann das Nachbruchverhalten jedoch maßgeblich verbessert werden. In gleicher Weise verhält es sich für die Zugabe einer Mikrobewehrung in dieser Größenordnung. Während bei faserbewehrten Proben die Verarbeitbarkeit den limitierenden Faktor bezüglich des Stahlgehaltes darstellt, ist der Stahlgehalt mikrobewehrter Proben grundsätzlich bis zur vollständigen Reduktion des Mattenabstandes untereinander steigerbar (vgl. Ferrocement, Kapitel 1.2.2), sodass überkritische Stahlgehalte möglich sind.

Mikrobewehrte Proben weisen in Abhängigkeit verschiedener Parameter zum Teil deutlich geringere Rissbreiten auf als faserbewehrte Proben. Je geringer die Maschenweite der Mikrobewehrung ist, desto geringer ist der Abstand der rissinitiierenden Querdrähte. Diese stellen eine Art Schwächung des Querschnitts dar und führen neben der Erhöhung der Rissanzahl schließlich zu einer Verringerung der Rissbreite. Verstärkt wird dieser Effekt der Beeinflussung der Rissentstehung je näher diese Querdrähte an der Oberfläche angeordnet sind. Entsprechend ergibt sich für eine Anordnung der Mikrobewehrung horizontal und nur geringer Betondeckung eine starke Beeinflussung der Rissentstehung. Bei ausreichend großer Betondeckung wird dieser Einfluss geringer. Eine geringe Betondeckung führt damit zu einer erhöhten Rissanzahl und geringeren Rissbreiten.

Unter ansteigender Last weisen mikrobewehrte Biegebalken bei einem ausreichenden Mikrobewehrungsgehalt eine steigende Anzahl von Rissen und den sogenannten "multiple-cracking-stage" auf. Eine höhere spezifische Oberfläche der Mikrobewehrung bzw. ein höherer Bewehrungsgrad führt zu höheren Spannungen bzw. Dehnungen in diesem Mehrfachrissstadium. Selbst bei großen Verformungen kann die Belastung auch nach mehreren Steifigkeitsverlusten infolge Rissbildung in der Druck- oder Zugzone oder auch im querkraftbeanspruchten Bereich durch die Mikrobewehrung gesteigert werden.

Bezüglich der Dauerhaftigkeitseigenschaften konnte im CDF-Test gezeigt werden, dass eine Mikrobewehrung die Mikrodrahtfasern ersetzen kann und sogar zu einer Verbesserung führt, da eine Betondeckung gezielt eingestellt werden kann und somit, anders als bei Fasern, Korrosion an der Bauteiloberfläche vermieden werden kann.

Kapitel 4

Analytische Beschreibung des Tragverhaltens

4.1 Allgemeines

Nachdem das Tragverhalten von unbewehrtem und mikrobewehrtem UHPC experimentell ermittelt wurde (Kapitel 3), werden nachfolgend die mathematischen Formulierungen zur Beschreibung des Tragverhaltens hergeleitet. Diese dienen als Grundlage für die numerischen Berechnungen (Kapitel 5) und die abschließende Erstellung eines Bemessungskonzeptes (Kapitel 6).

Alle nachfolgenden Gleichungen gelten für eine gleichmäßige Verteilung der Mikrobewehrungsmatten über die Querschnittshöhe.

4.2 Druck

Anhand der durchgeführten Versuche (Kapitel 3.4) liegt das Spannungs-Dehnungsverhalten für unbewehrten und mikrobewehrten UHPC unter einer Druckbeanspruchung vor. Kennzeichnend sowohl für den unbewehrten als auch den mikrobewehrten UHPC ist der lineare Anstieg der Spannung bis zu ca. 80 % der Druckfestigkeit.

Mit Hilfe der Funktion nach Thorenfeldt et al. [ThTJ87] (Gleichung (4.1), adaptiert für vorliegende Formelzeichen) für hochfeste Betone kann auch die Spannungs-Dehnungs-Beziehung des untersuchten un- und mikrobewehrten UHPC abgebildet werden.

$$\sigma_{\text{UHPC}}(\epsilon_{\text{UHPC}}) = \frac{\sigma_{\text{UHPC,min}} \cdot \frac{\epsilon_{\text{UHPC}}}{\epsilon_{\text{UHPC,min}}} \cdot m}{m - 1 + \left(\frac{\epsilon_{\text{UHPC}}}{\epsilon_{\text{UHPC,min}}} \right)^{m \cdot k}} \quad (4.1)$$

Mit

$\sigma_{\text{UHPC,min}}$	minimale Spannung (Druckspannung) Zylinder
$\epsilon_{\text{UHPC,min}}$	Dehnung bei Erreichen von $\sigma_{\text{UHPC,min}}$
m	$E_{\text{UHPC}} / (E_{\text{UHPC}} - E_s)$
E_{UHPC}	Tangenten-E-Modul im Ursprung
E_s	Sekanten-E-Modul ($\sigma_{\text{UHPC,min}} / \epsilon_{\text{UHPC,min}}$)
k	1 für $0 > \epsilon_{\text{UHPC}} > \epsilon_{\text{UHPC,min}}$ bzw. $0,67 + \sigma_{\text{UHPC,min,cube}} / 62$ für $\epsilon_{\text{UHPC}} \geq \epsilon_{\text{UHPC,min}}$
$\sigma_{\text{UHPC,min,cube}}$	minimale Spannung (Druckspannung) Würfel $\approx \sigma_{\text{UHPC,min}}$

Aufgrund der Sprödigkeit des unbewehrten UHPC besitzt die vorliegende Beschreibung jedoch lediglich bis zu einer Stauchung $\epsilon_{\text{UHPC}} = \epsilon_{\text{UHPC,min}}$ Gültigkeit. Auch im Falle von mikrobewehrtem UHPC wird infolge des "semi-duktilen" Materialverhaltens (Kapitel 3.4) und der Streuung des abfallenden Astes auf der sicheren Seite liegend die Einhaltung der entsprechenden Grenzstauchung empfohlen.

Die Auswertung der Gleichung (4.1) liefert für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersuchte Mischung M1 und M1 mit Mikrobewehrung die Beziehung nach Abbildung 4.1. Die gegebene Funktion bildet die im Versuch ermittelten Wertepaare (dünne Linien in Abbildung 4.1) sehr gut ab und wird daher im folgenden für die Bemessung herangezogen.

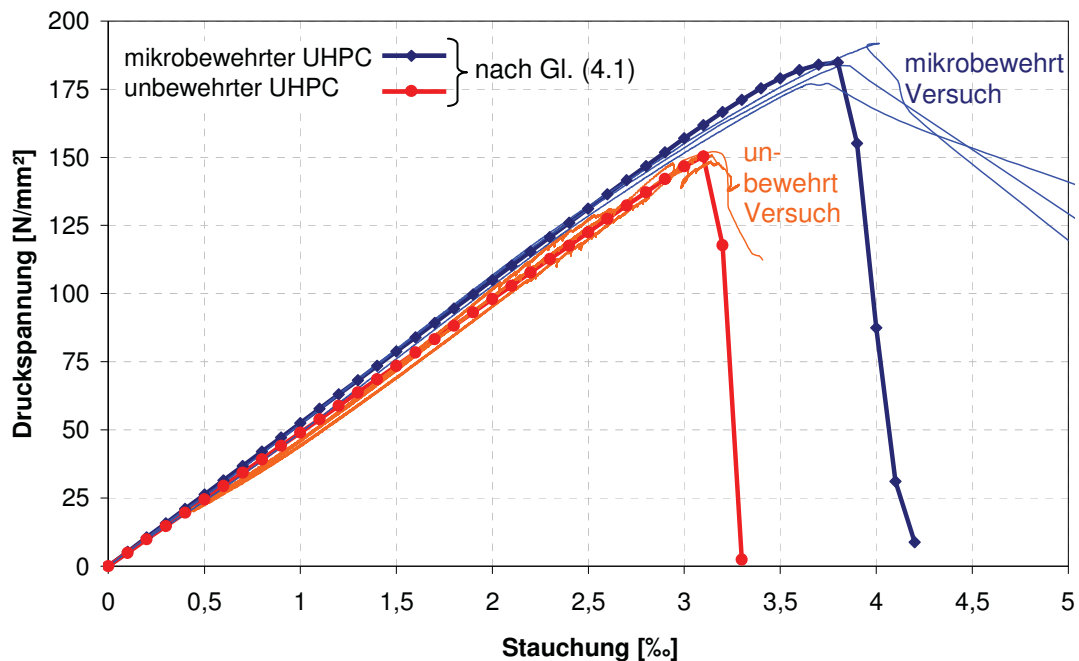


Abbildung 4.1: Ausgewertete Spannungs-Dehnungs-Linie für un- und mikrobewehrten UHPC und Versuchsergebnisse als Vergleich

4.3 Zug und Rissmechanik

4.3.1 Mikrobewehrung

Gemäß der zentrischen Zugversuche (Kapitel 3.2) ergibt sich für die Mikrobewehrung ein für Stahl typischer Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Linie (Abbildung 3.3). Das zunächst linear-elastische Verhalten endet mit Erreichen der Fließgrenze. Im anschließenden Fließbereich erfolgt eine Verfestigung bis hin zum Erreichen der Zugfestigkeit. In Abbildung 4.2 ist das idealisierte Verhalten der Mikrobewehrung als trilineare Funktion dargestellt. Die Abweichung der Einzelwerte aus dem Versuch und idealisiertem Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Linie beträgt maximal 3 %. Die Fließgrenze aller verwendeten Mikrobewehrungstypen beträgt $\sigma_{MB,y} = 265 \text{ N/mm}^2$. Die Verfestigung bis auf eine Spannung von 380 N/mm^2 ist bei einer Dehnung von 8,8 % erreicht. Bis zu einer Bruchdehnung von ca. 20 % kommt es lediglich zu einer Verlängerung des Drahtes unter der Maximalspannung von 380 N/mm^2 .

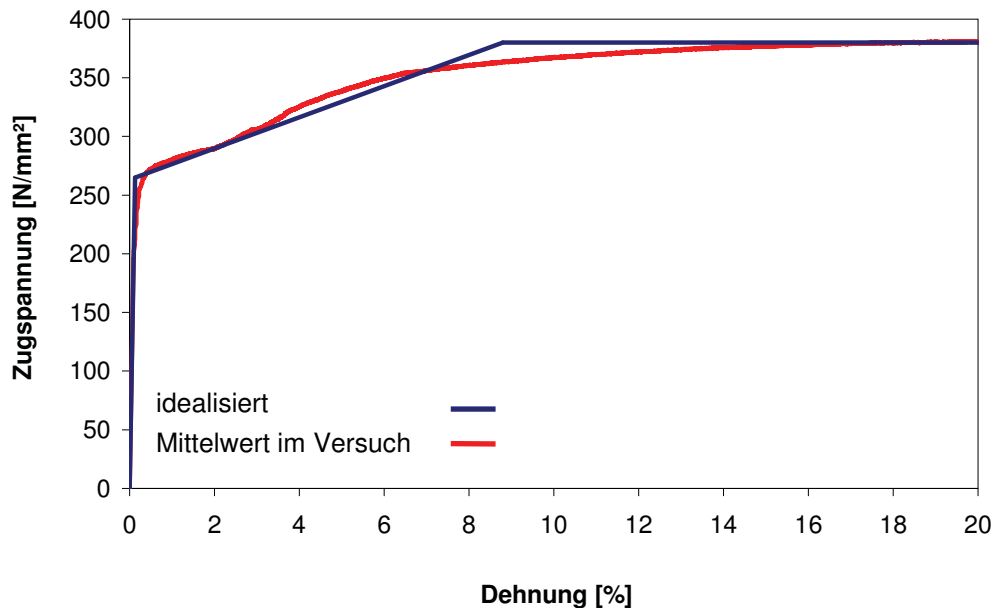


Abbildung 4.2: Spannungs-Dehnungs-Linie für die Mikrobewehrung (Versuch und idealisiert für Berechnung)

4.3.2 Unbewehrter UHPC

Ultrahochleistungsbeton ist ein elastisch-sprödes Material, welches unter einer Zugbeanspruchung ein zunächst elastisches Verhalten aufweist. Während die Dehnungen zunächst linear direkt mit den Spannungen verknüpft sind, kommt es bei Erreichen der Zugfestigkeit zu einer Lokalisierung der Dehnungen mit der Folge einer Rissentstehung in der Prozesszone. Bis zu diesem Punkt erfolgt die Charakterisierung des Materialverhaltens über eine Spannungs-Dehnungs-Linie der Form

$$\sigma_{\text{UHPC}} = \varepsilon_{\text{UHPC}} \cdot E_{\text{UHPC}} \quad (4.2)$$

Ab der Rissentstehung ist die Verteilung der Dehnungen über die gezogene Länge nicht mehr gleichmäßig und das Verhalten somit nicht mehr als Spannungs-Dehnungs-Linie anzugeben. Anstelle dieser wird ab dem Zeitpunkt der Rissbildung daher in der Regel eine Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung zur Beschreibung des Tragverhaltens verwendet. Dieses Vorgehen wurde von Hillerborg et al. [HiMoPe76] für Normalbeton als "Fictitious-crack-model" eingeführt (Abbildung 4.3).

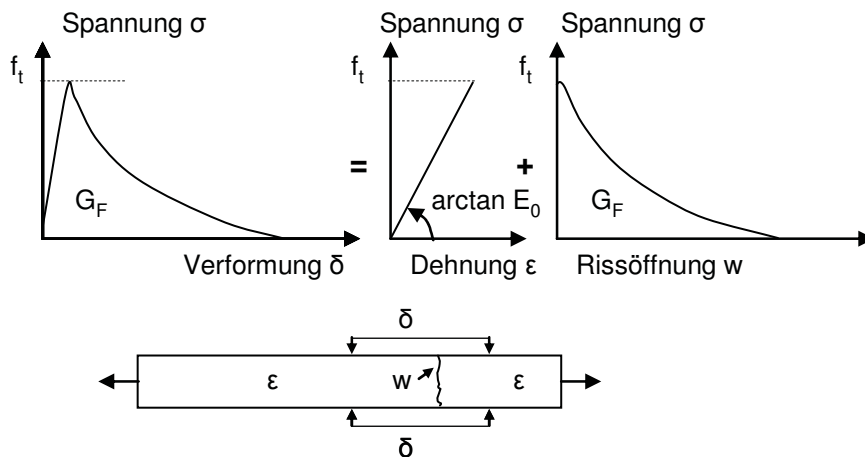


Abbildung 4.3: Fictitious-crack-model gemäß [HiMoPe76]

Innerhalb dieses Modells wird zwischen den Verläufen der Entfestigung unterschieden. Je nach Ansatz finden sich lineare, ein- oder mehrfach abgeknickte lineare Einzelabschnitte, exponentielle oder polynomische Verläufe höherer Ordnung.

Während im vorgenannten Modell der diskrete Einzelriss betrachtet wird, liegt im "Crack-band-model" von Bazant und Oh [BaOh83] der Fokus auf der verschmierten Rissbeschreibung. Hierbei wird die Breite der Prozesszone, das so genannte Rissband, berücksichtigt und für die Breite des Rissbandes eine Spannungs-Dehnungs-Beziehung eingeführt. Die Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung ergibt sich dann über Multiplikation der Dehnung mit der Rissbandbreite.

Da die Erfassung des Nachbruchbereiches insbesondere für den spröden (unbewehrten) UHPC mit sehr hohem messtechnischen Aufwand verbunden ist und im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht erfasst wurde, wird an dieser Stelle auf Untersuchungen von Ma et al. [MaSW03] verwiesen. Diese geben für ultrahochfesten Feinkornbeton einen linearen Verlauf der Entfestigung an. Die zugehörige Bruchenergie, als Integral der Entfestigung, wird mit 50 bis 60 N/m angegeben. Damit kann die Rissbreite $w_{UHPC,max}$ bestimmt werden, bis zu der der unbewehrte UHPC Zugspannungen übertragen kann.

$$w_{UHPC,max} = \frac{2 \cdot G_F}{\sigma_{UHPC,max}} \quad (4.3)$$

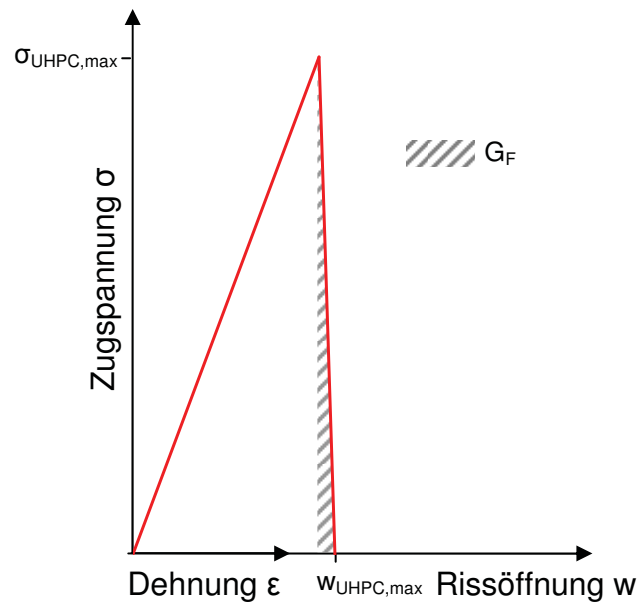


Abbildung 4.4: Kraft-Verformungs-Beziehung für unbewehrten UHPC

4.3.3 Verbund

Der Verbund zwischen Mikrobewehrung und UHPC sichert die Kraftübertragung beider Materialien und beeinflusst wie im Stahlbetonbau maßgeblich die Rissabstände und Rissbreiten.

Im Stahlbetonbau werden im wesentlichen drei Traganteile des Verbundes zwischen Stahl und Beton berücksichtigt, die auch bei mikrobewehrtem UHPC relevant sind.

a) Haftverbund = Physikalische Bindung

Der Haftverbund basiert maßgeblich auf der Klebewirkung zwischen Zementstein und Stahl. Bereits bei geringen Relativverschiebungen der beiden Materialien wird der Haftverbund aufgehoben. Infolge der glatten Oberfläche der Drähte besitzt der Haftverbund zwischen Mikrobewehrung und UHPC-Matrix einen sehr geringen Traganteil.

b) Scherverbund = Mechanische Verzahnung

Bei profilierten Stählen wirken die Rippen des Stahlstabes auf die einzelnen zwischen den Rippen liegenden Betonkonsolen, sodass der Stahl zunächst im umliegenden Beton verzahnt ist. Der Scherverbund endet aufgrund der Mikrorissbildung als Folge der Sprengwirkung in der Betondeckung bzw. bei einem Abscheren des Betons. Infolge der hohen Wirksamkeit des Scherverbundes ist der Kurvenverlauf der Verbund-Spannungs-Schlupf-Beziehung in diesem Bereich stark ansteigend (vgl. Abbildung 4.6).

Die Mikrobewehrung besteht aus glatten Einzeldrähten ohne Oberflächenprofilierung. Dennoch ist durch die Schweißung der Einzeldrähte zur Matte eine in regelmäßigen Abständen auftretende Verzahnung vorhanden. Der Scherverbund ist bei dem untersuchten mikrobewehrten UHPC durch die Maschenstruktur so stark ausgeprägt, dass dieser die Zugfestigkeit der Mikrobewehrung überschreitet. In den Kreuzungspunkten zwischen Längs- und Querdrahten herrscht daher starrer Verbund.

c) Reibungsverbund

Mit Überwinden der Haftung und des Scherwiderstandes existiert eine Relativverschiebung zwischen geripptem Stabstahl und Beton und damit ein Reibungswiderstand durch die Walzrauhigkeit der Stahloberfläche. Dieser Reibungswiderstand ist auch zwischen Mikrobewehrung und UHPC vorhanden. Durch den stark ausgeprägten Scherwiderstand existiert zwar kein direkter Schlupf zwischen beiden Verbundkomponenten, doch eine Dehnung des Stahls bewirkt eine Relativverschiebung, welche wiederum die Reibung aktiviert.

Im Fall des Drahtes ohne Querdrahte (Sonderfall) ist die Wirkung des Reibungsverbundes Abbildung 3.7 zu entnehmen. Nach Überwinden des Haftverbundes wird der glatte Draht aufgrund der fehlenden Verankerung (= Querdraht) aus der Matrix gezogen. Mit steigendem Schlupf wird die Reibungskomponente jedoch reduziert.

Bei dem in der vorliegenden Arbeit zu Vergleichszwecken herangezogenen faserbewehrten UHPC sind von den zuvor aufgeführten Traganteilen im wesentlichen zwei für das Zusammenwirken des Verbundwerkstoffs anzuführen. Die Mikrodrahtfasern besitzen eine glatte Oberfläche und gerade Faserenden. Die Traganteile des Verbundes beschränken sich damit auf den Haft- und den Reibungsverbund (Abbildung 4.5). Die Zugfestigkeit der Mikrodrahtfasern ist mit 2200 N/mm² im Vergleich zur Festigkeit der Mikrobewehrung sehr hoch. Das Versagen von faserbewehrtem UHPC ist daher in der

Regel Folge des Faserauszugs, während das Versagen von mikrobewehrtem UHPC üblicherweise durch ein Fließen und anschließendes Reißen der Mikrobewehrung bestimmt wird. Eine Ausnahme bildet die Verwendung von einzelnen glatten Mikrobewehrungsdrähten. Diese weisen ein Verbundverhalten ähnlich dem der Stahlfasern auf (Abbildung 3.7).

Damit stellt das Verbundverhalten den maßgebenden Unterschied im Tragverhalten zwischen faser- und mikrobewehrtem UHPC dar.

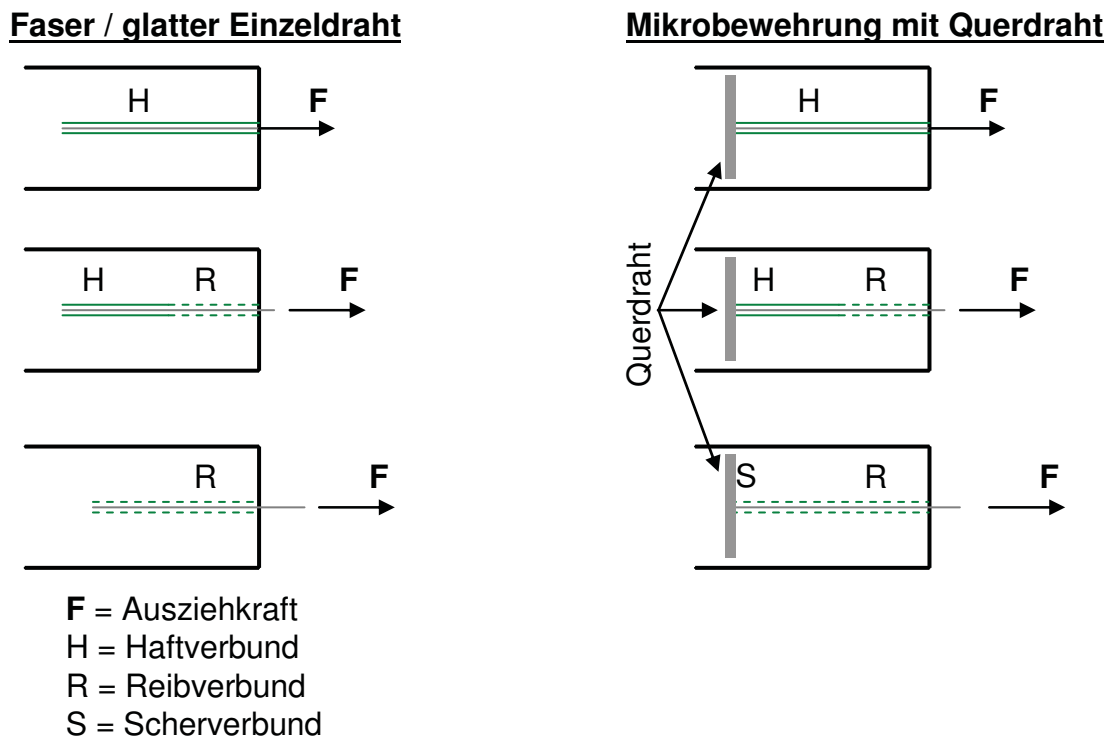


Abbildung 4.5: Traganteile des Verbundes für Fasern (li.) und Mikrobewehrung (re.)

Im Allgemeinen wird das Verbundverhalten zwischen Stahl (Stabstahl, Fasern) und Beton (Normalbeton, hochfester Beton, ultrahochfester Beton, etc.) durch die Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung abgebildet. Die Verbundspannung wird dabei nach Gleichung (4.4) in Abhängigkeit der Ausziehungskraft F , dem Durchmesser der Bewehrung \varnothing und der Verbundlänge l_b berechnet.

$$\tau_b = \frac{F}{\pi \cdot \varnothing \cdot l_b} \quad (4.4)$$

In Abbildung 4.6 ist eine solche Beziehung für glatten und profilierten Stahl angegeben. Zusätzlich sind die zuvor aufgeführten Traganteile entsprechend gekennzeichnet.

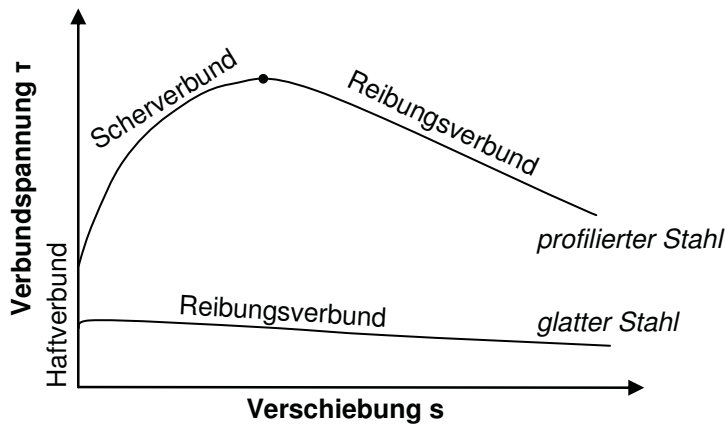


Abbildung 4.6: Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung mit den Traganteilen des Verbundes für gerippten Betonstahl und glatten Stahl

Für die glatten Einzeldrähte der Mikrobewehrung (ohne Querdraht) nehmen die Einbinde-länge sowie die Ausziehkraft nach Erreichen der Haftung des glatten Drahtes stetig ab. Eine Auswertung der zugehörigen Versuchsdaten liefert den in Abbildung 4.6 für glatten Stahl angegebenen Zusammenhang zwischen Verbundspannung und Verschiebung. Idealisiert ergibt sich hieraus ein starr-plastisches Verbundgesetz, das Pfyl [Pf03] zur Beschreibung des Verbundverhaltens glatter Stahlfasern vorschlägt.

Im Gegensatz zum glatten Einzeldraht werden glatte Drähte in Maschenstruktur nicht aus der Matrix herausgezogen. Die Verbundlänge bleibt während des gesamten Versuchs konstant, es existiert kein Schlupf. In den Kreuzungspunkten von Längs- und Querdrähten gibt es keine Verschiebung zwischen Mikrobewehrung und UHPC-Matrix. Daher ist für die verwendeten Mikrobewehrungsmatten die Angabe einer Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung nicht sinnvoll. Die maximal übertragbare Verbundspannung auf der freien Länge zwischen den Querdrähten entspricht derjenigen der glatten Einzeldrähte.

Gemäß den experimentellen Untersuchungen (Kapitel 3.3.2) entspricht die maximal erreichbare Ausziehkraft (Mittelwert aus drei Proben: $F_m = 228,5 \text{ N}$) in etwa der Fließkraft der Mikrobewehrung ($F_y = 208 \text{ kN}$). Die maximale Verbundspannung zwischen den Querdrähten lässt sich damit nach Gleichung (4.5) ermitteln.

$$\tau_{b,MB,max} = \frac{\sigma_{MB,y} \cdot \varnothing_{MB}}{4 \cdot l_{MW}} \quad (4.5)$$

Mit

$\tau_{b,MB,max}$ maximale Verbundspannung der Mikrobewehrung

$\sigma_{MB,y}$ Fließspannung der Mikrobewehrung

\varnothing_{MB} Drahtdurchmesser der Mikrobewehrung

l_{MW} Maschenweite

Für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersuchten Mikrobewehrungsmatten ergeben sich die maximalen Verbundspannungen auf der Länge zwischen den Querdrähten gemäß Tabelle 4.1.

Tabelle 4.1: Verbundspannung der unterschiedlichen Mikrobewehrungstypen

Mikrobewehrungstyp	Verbundspannung $\tau_{b,MB}$ [N/mm ²]
MB1	6,6
MB3	6,2
MB4	5,0
MB5	6,6

4.3.4 Mikrobewehrter UHPC

Das Tragverhalten des Verbundwerkstoffes folgt grundsätzlich dem des auf Zug belasteten Stahlbetons. Daher sind die aus dem Stahlbetonbau bekannten Zusammenhänge der Rissmechanik nachfolgend kurz zusammengefasst und für mikrobewehrten UHPC adaptiert.

Zunächst ist zu unterscheiden, welcher Risszustand des Zugkörpers vorliegt. Dabei wird zwischen dem ungerissenen Zustand (Zustand I), dem Zustand der Einzelrissbildung (Zustand II) und dem der abgeschlossenen Rissbildung (Zustand III) unterschieden (Abbildung 4.7).

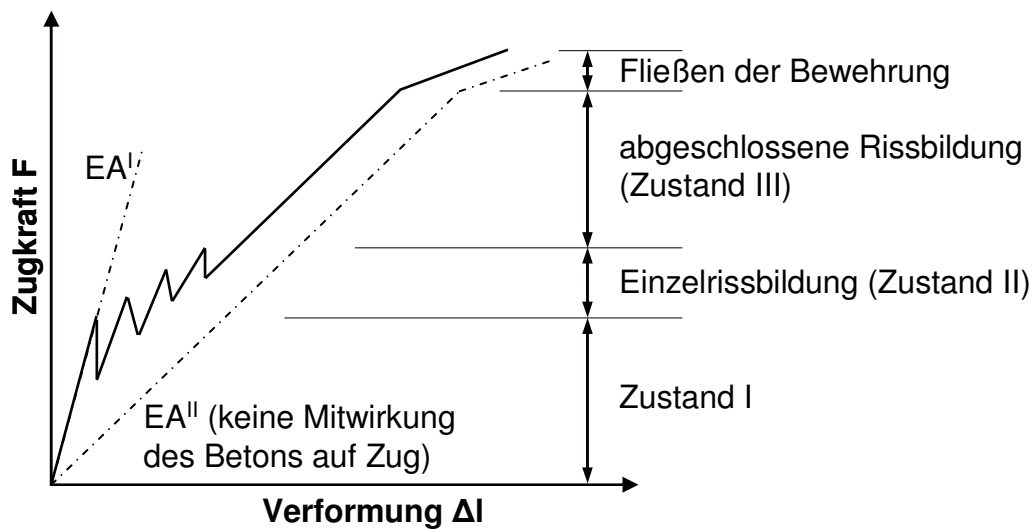


Abbildung 4.7: Last-Verformungs-Beziehung eines Stahlbetonzugstabs (weggesteuerte Belastung)

1. Zustand I - ungerissener UHPC

In dieser Phase sind die Dehnungen in UHPC und Mikrobewehrung identisch. Die Beziehung zwischen Zugkraft und Verlängerung des Zugkörpers ist linear.

Die Festigkeit und Steifigkeit des Verbundmaterials liegen über denen des unbewehrten UHPC. Mikrobewehrung und UHPC beteiligen sich entsprechend ihrer Steifigkeit und ihres Volumenanteils gemäß Gleichung (4.7) am Lastabtrag.

$$E_{\text{comp}} = E_{\text{UHPC}} \cdot V_{\text{UHPC}} + E_{\text{MB}} \cdot \eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}} \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{comp}} &= (E_{\text{UHPC}} \cdot V_{\text{UHPC}} + E_{\text{MB}} \cdot \eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}}) \cdot \epsilon_{\text{UHPC}} \\ &= \sigma_{\text{UHPC}} \cdot (1 + \eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}} \cdot (\alpha - 1)) \end{aligned} \quad (4.7)$$

wobei

ϵ_{UHPC} = ϵ_{MB} im ungerissenen Zustand

α das Verhältnis der E-Moduli $E_{\text{MB}}/E_{\text{UHPC}}$

η_{MB} die Wirksamkeit der Mikrobewehrung in Beanspruchungsrichtung (bei quadratischer Maschenstruktur = 0,50)

V_{MB} der Mikrobewehrungsgehalt

V_{UHPC} = $1,0 - \eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}}$

2. Zustand II - Rissbildung

Bei Erreichen der Zugfestigkeit der UHPC-Matrix erfolgt die Erstrissbildung. Im Trennriss wird bis auf einen verhältnismäßig geringen Anteil der Bruchenergie der UHPC-Matrix die gesamte Zugkraft von der Mikrobewehrung übernommen. Damit steigt die Spannung der Mikrobewehrung lokal um die zugehörige Spannungsdifferenz an (Abbildung 4.8). Durch den entstehenden Dehnungsunterschied, der die Breite des Einzelrisses bestimmt, ergeben sich Verbundspannungen zwischen Mikrobewehrung und UHPC, die über die Einleitungslänge l_e zu beiden Seiten des Risses Zugkräfte in den UHPC einleiten. Für glatte Einzeldrähte ohne Maschenstruktur bestimmt sich diese Lasteinleitungslänge zu

$$l_e = \frac{\sigma_{\text{UHPC,max}} \cdot d_{\text{MB}}}{4 \cdot \tau_{\text{MB}} \cdot \eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}}} \quad (4.8)$$

$\sigma_{\text{UHPC,max}}$ entspricht dabei der Zugfestigkeit der UHPC-Matrix.

In Gleichung (4.8) bleibt die Wirkung der Querdrähte auf das Verbundverhalten unberücksichtigt. Für die verwendete Mikrobewehrung (Mikrobewehrungstyp MB1, MB2, MB3, MB5 und Stahlgüte S235) und die untersuchten Mikrobewehrungsgehalte (2,4 Vol.-% - 6,1 Vol.-%) in Kombination mit dem Ultrahochleistungsbeton der Mischung M1 liegen die berechneten Lasteinleitungslängen stets deutlich oberhalb des Abstandes der Querdrähte. Dies bedeutet, dass theoretisch ein Dehnungsunterschied zwischen Mikrobewehrung und UHPC im Kreuzungspunkt von Längs- und Querdrähten existiert, was in den experimentellen Untersuchungen (Kapitel 3.3.2) jedoch widerlegt wurde. Gleichung (4.8) kann damit nicht zur Berechnung der Lasteinleitungslänge von Mikrobewehrungsmatten herangezogen werden. Aufgrund des starren Verbundes an den Kreuzungspunkten zwischen Längs- und Querdrähten gilt vielmehr

$$l_e = l_{\text{MW}} \quad (4.9)$$

In Abbildung 4.8 ist schematisch der Dehnungsverlauf in Mikrobewehrung und UHPC-Matrix für einen Einzelriss dargestellt.

Um einen Übergang in den Zustand II zu gewährleisten, ist ein "überkritischer" Bewehrungsgehalt nötig, d.h. die Risskraft F_{cr} muss durch die Mikrobewehrung abgedeckt werden können. Die Spannung der Mikrobewehrungsdrähte im Riss muss damit folgender Bedingung genügen:

$$\sigma_{MB} = \frac{F_{cr}}{A_{MB}} \leq \sigma_{MB,u} \quad (4.11)$$

bzw.

$$\sigma_{MB,u} \geq \frac{\sigma_{UHPC,max} \cdot (A_{UHPC} + \alpha \cdot A_{MB})}{A_{MB}} \quad (4.12)$$

Mit

σ_{MB} Spannung Mikrobewehrung

F_{cr} Risskraft

A_{MB} effektive (in Zugrichtung angeordnete) Querschnittsfläche der Mikrobewehrung

$\sigma_{MB,u}$ Bruchspannung Mikrobewehrung

A_{UHPC} effektive (in Zugrichtung angeordnete) Querschnittsfläche der Mikrobewehrung

A_{UHPC} Nettoquerschnittsfläche UHPC-Matrix

Durch Einführen der Volumenanteile und Umformen ergibt sich ein Mindestanteil an Mikrobewehrung in Zugrichtung zu:

$$V_{MB,L,min} \geq \frac{1}{\frac{\sigma_{MB,u}}{\sigma_{UHPC,max}} + 1 - \alpha} \quad (4.13)$$

Für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendeten Zugprobekörper genügt der in Zugrichtung vorhandene Mikrobewehrungsgehalt den Anforderungen nach Gleichung (4.13) aufgrund der Vergleichbarkeit zu stahlfaserbewehrtem UHPC mit einem Stahlgehalt von 2,4 Vol.-% nicht. Daher entsteht im Zustand II lediglich ein Riss mit anwachsender Rissbreite. Nach dem Erstriss (Spannung im Verbundwerkstoff $\sigma_{comp,max}$, Beziehung nach Gleichung (4.7)) folgt ein Kraftabfall bis zur Aktivierung der Mikrobewehrung. In Anlehnung an [MaSW03] wird für den feinkörnigen UHPC die Bruchenergie G_F zu 50 - 60 N/m mit einem linearen Entfestungsverlauf angesetzt. Dieser lineare Abschnitt ($0 \leq w \leq w_{UHPC,max}$) wird durch Gleichung (4.14) beschrieben.

$$\sigma_{\text{comp}}(w) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma_{\text{UHPC,max}}}{G_F} \cdot \eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}} \cdot w \cdot \left(\sigma_{\text{UHPC,max}} + \frac{E_{\text{MB}} \cdot G_F}{I_{\text{MW}} \cdot \sigma_{\text{UHPC,max}}} - \frac{\sigma_{\text{UHPC,max}}}{\eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}}} \right) + \sigma_{\text{UHPC,max}} \cdot (1 + \eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}} \cdot (\alpha - 1)) \quad (4.14)$$

Die Gleichung (4.14) setzt voraus, dass die Dehnung der Mikrobewehrung bei der Rissöffnung $w_{\text{UHPC,max}}$ unterhalb der Fließdehnung liegt. Diese Annahme ist für die vorliegende UHPC-Mischung M1, bei Ansatz einer Bruchenergie von 50 - 60 N/m und der Mikrobewehrung gemäß (Abbildung 4.2) mit einer Maschenweite > 5 mm stets gegeben. In Anhang B1 ist die allgemeine Beziehung für eine Dehnung der Mikrobewehrung oberhalb der Fließdehnung angegeben.

Anschließend an den abfallenden linearen Abschnitt verbleibt die Matrix im Rissquerschnitt spannungslos und die extern aufgebrachte Kraft wird allein durch die Mikrobewehrung übertragen. In diesem Intervall ($w_{\text{UHPC,max}} \leq w \leq w_u$) gilt die folgende Beziehung:

$$\sigma_{\text{comp}}(w) = \begin{cases} \left(\frac{w}{2 \cdot I_{\text{MW}}} + \frac{\sigma_{\text{UHPC,max}}}{E_{\text{UHPC}}} \right) \cdot E_{\text{MB}} \cdot \eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}} & \text{für (1)} \\ \left(\frac{\frac{w}{2 \cdot I_{\text{MW}}} + \frac{\sigma_{\text{UHPC,max}}}{E_{\text{UHPC}}} - \varepsilon_{\text{MB,y}}}{\varepsilon_{\text{MB,max}} - \varepsilon_{\text{MB,y}}} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{\text{MB,max}}}{\sigma_{\text{MB,y}}} - 1 \right) + 1 \cdot \sigma_{\text{MB,y}} \cdot \eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}} & \text{für (2)} \\ \sigma_{\text{MB,max}} \cdot \eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}} & \text{für (3)} \end{cases} \quad (4.15)$$

$$\text{wobei (2) } \left\{ \begin{array}{l} (1) \quad \left(\frac{w}{2 \cdot I_{\text{MW}}} + \frac{\sigma_{\text{UHPC,max}}}{E_{\text{UHPC}}} \right) \leq \varepsilon_{\text{MB,y}} \\ \varepsilon_{\text{MB,y}} < \left(\frac{w}{2 \cdot I_{\text{MW}}} + \frac{\sigma_{\text{UHPC,max}}}{E_{\text{UHPC}}} \right) \leq \varepsilon_{\text{MB,max}} \\ (3) \quad \varepsilon_{\text{MB,max}} < \left(\frac{w}{2 \cdot I_{\text{MW}}} + \frac{\sigma_{\text{UHPC,max}}}{E_{\text{UHPC}}} \right) \leq \varepsilon_{\text{MB,u}} \end{array} \right.$$

Abbildung 4.9 zeigt schematisch den Verlauf der aufnehmbaren Zugspannung des Verbundquerschnitts über die Dehnung bzw. Rissöffnung für einen linearen Ansatz der Entfestigung. Aus den Gleichungen (4.14) und (4.15) ergibt sich eine Mindestzugspannung $\sigma_{\text{comp,min}} = \sigma_{\text{comp}}(w_{\text{UHPC,max}})$, die unmittelbar nach dem Erstriss aufgenommen werden kann.

In Abbildung 4.10 und Abbildung 4.11 sind die Gleichungen (4.14) und (4.15) für die in Kapitel 3.5.4 getesteten Proben ausgewertet und den Versuchsergebnissen gegenübergestellt sowie die ansetzbare Mindestzugfestigkeit gekennzeichnet. Während das reine Stahlverhalten (ab Erreichen von $\sigma_{\text{comp,min}}$) sehr gut mit der idealisierten trilinearen Spannungs-Dehnungs-Linie, in Kombination mit dem Ansatz der Lasteinleitungslänge als doppelte Maschenweite, abgebildet werden kann, ergeben sich für die Mindestzugfestigkeit der Versuchswerte durchweg höhere Spannungen. Diese unterliegen allerdings sehr großen Streuungen und wie bereits in Kapitel 3.5 erwähnt, erfordert die exakte Bestimmung des Entfestigungsastes eine ausreichende Steifigkeit der Prüfeinrichtung, welche hier nicht gegeben war. Zumindest kann festgehalten werden, dass der Ansatz eines linearen Entfestigungsverhaltens in Kombination mit einer Bruchenergie von 50 N/m die tatsächlich vorhandene Mindestzugfestigkeit unterschätzt (Abbildung 4.10) und die Annahmen bzgl. der Entfestigung daher konservativ sind.

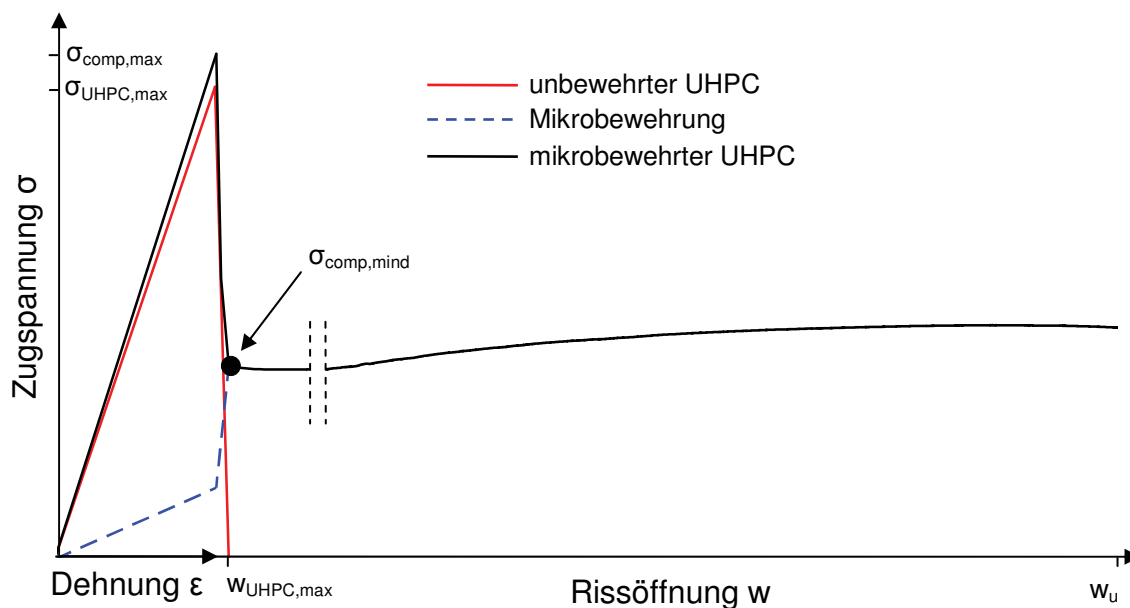


Abbildung 4.9: Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung für mikrobewehrten UHPC - unterkritischer Mikrobewehrungsgehalt (schematisch), Zugspannung bezogen auf Verbundquerschnitt

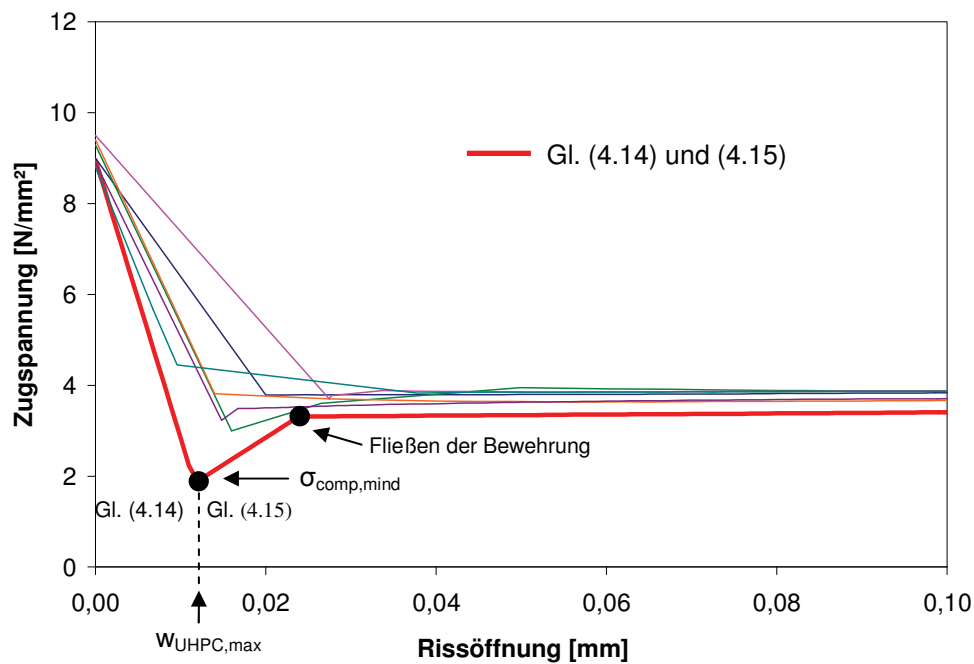


Abbildung 4.10: Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung mikrobewehrter UHPC, Gegenüberstellung Versuchsdaten und Gl.(4.14), (4.15) - bis $w = 0,1$ mm

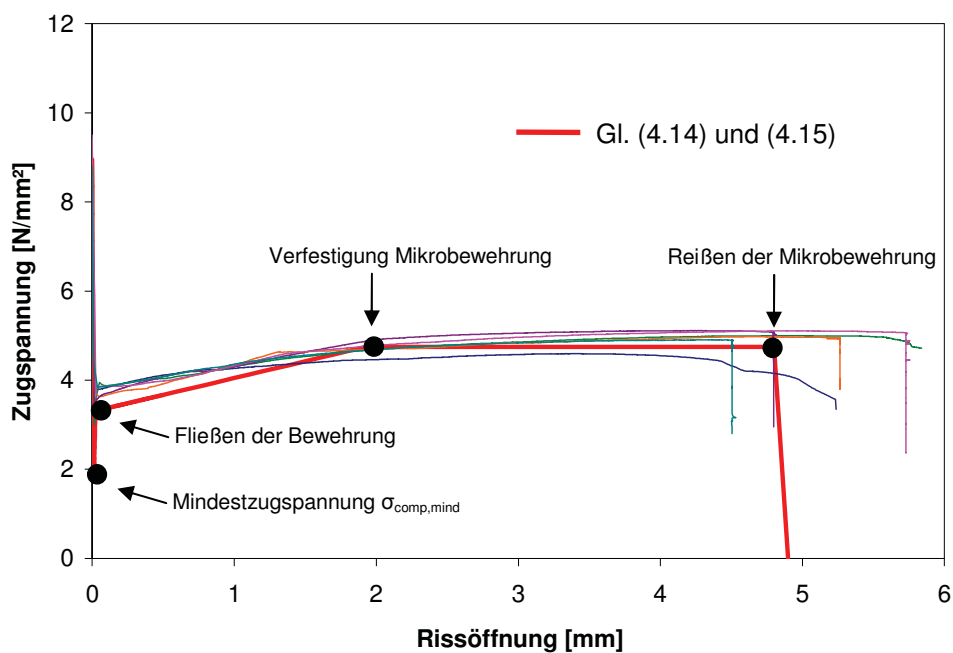


Abbildung 4.11: Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung mikrobewehrter UHPC, Gegenüberstellung Versuchsdaten und Gl. (4.14), (4.15) - bis Versagen

3. Zustand III - Abgeschlossenes Rissbild

Aufgrund des unterkritischen Stahlgehaltes der untersuchten Proben, ergibt sich für diese lediglich ein Riss. Der Zustand III erfordert einen ausreichenden Stahlgehalt gemäß Gleichung (4.13).

Sobald die Dehnungsdifferenz von Mikrobewehrung und UHPC über die gesamte Länge des Stabes vorliegt und die Abstände zwischen den Rissen für eine weitere Rissbildung nicht ausreichen, liegt das abgeschlossene Rissbild vor (Abbildung 4.12 und Abbildung 4.13).

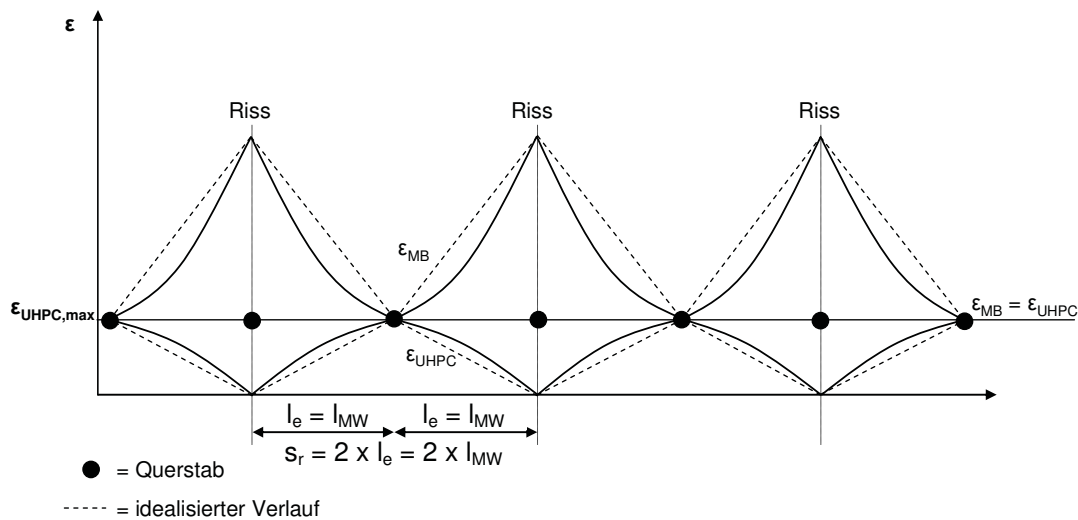


Abbildung 4.12: Dehnungen des mikrobewehrten Zugstabs bei abgeschlossenem Rissbild für den maximalen Rissabstand

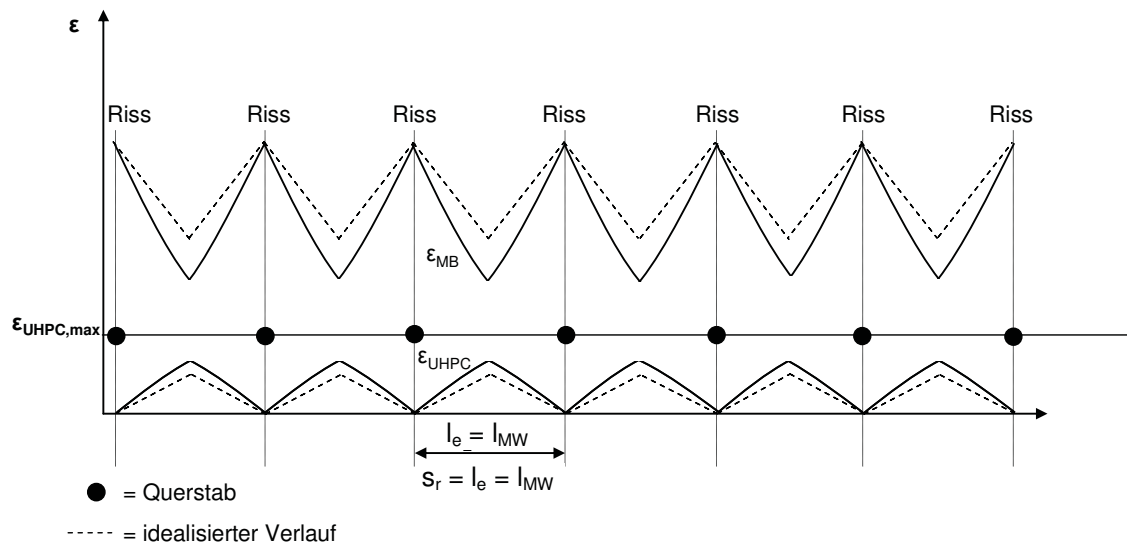


Abbildung 4.13: Dehnungen des mikrobewehrten Zugstabs bei abgeschlossenem Rissbild für den minimalen Rissabstand

4. Fließen der Mikrobewehrung

Nach Erreichen des abgeschlossenen Rissbildes beginnt das Fließen der Mikrobewehrung. Zwar ergibt sich bedingt durch die Verfestigung der Mikrobewehrung eine Zunahme der Zugkraft, diese wird jedoch von großen Verformungen der Mikrobewehrung und anwachsenden Rissbreiten begleitet.

4.3.5 Einflussfaktoren

Zur Veranschaulichung des Einflusses des Mikrobewehrungsgehaltes, der Stahlgüte, der Maschenweite sowie des Durchmessers der Mikrobewehrung und des angesetzten Entfestigungsgesetzes und der Bruchenergie sind nachfolgend die Gleichungen (4.14) und (4.15) für variierende Parameter ausgewertet.

a) Mikrobewehrungsgehalt

Mit steigendem Mikrobewehrungsgehalt resultiert neben einer minimal erhöhten Zugspannung des Verbundquerschnittes auch eine höhere Mindestzugspannung $\sigma_{\text{comp, mind}}$. Abbildung 4.14 und Abbildung 4.16 verdeutlichen den Einfluss des Mikrobewehrungsgehaltes.

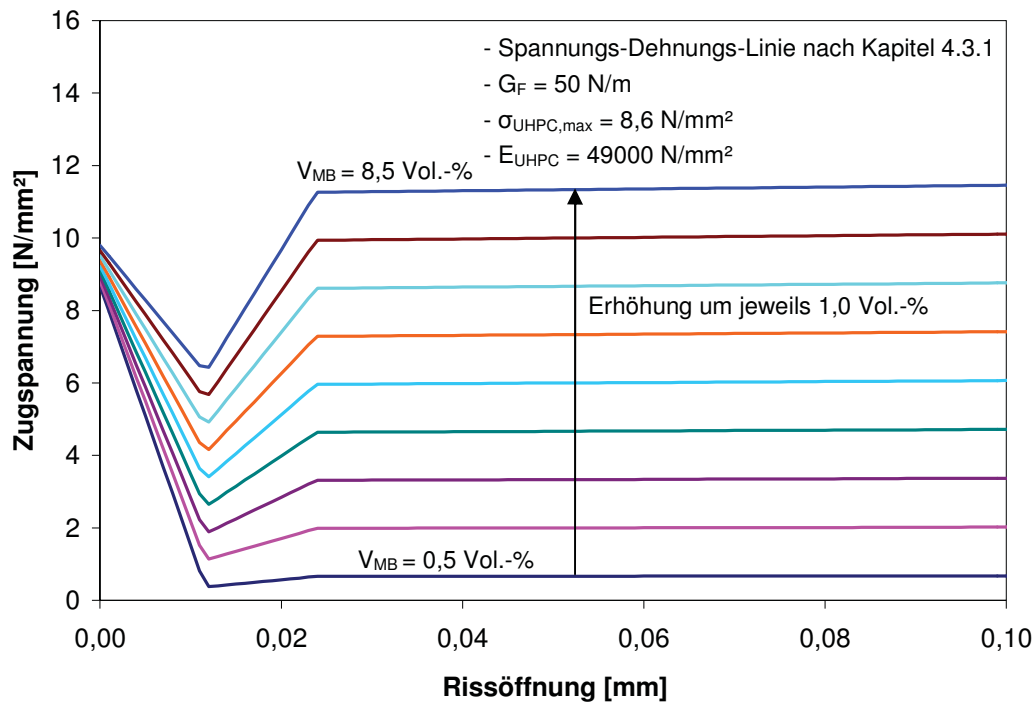


Abbildung 4.14: Einfluss des Mikrobewehrungsgehaltes auf die Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung des mikrobewehrten UHPC

Mit den zuvor definierten Materialgesetzen liegt die Zugspannung des Verbundmaterials erst ab einem Mikrobewehrungsgehalt von 5 Vol.-% unterhalb der Bruchspannung der Mikrobewehrung. Ab einem Mikrobewehrungsgehalt von 7,5 Vol.-% übersteigt die Fließspannung der Mikrobewehrung die Zugspannung des Verbundmaterials. Der Grund für die erforderlichen hohen Mikrobewehrungsgehalte zur Aufnahme der Risskraft liegt in der ungünstigen Kombination aus sehr hoher Matrix-Zugfestigkeit des UHPC und nur geringer Zugfestigkeit und Fließspannung des verwendeten Mikrobewehrungsdrahtes.

b) Güte der Mikrobewehrung

Unter Verwendung der Gleichungen (4.14) und (4.15) mit dem Ansatz drei unterschiedlicher Stahlgüten (Materialgesetze gemäß Abbildung C 1.1, Anhang C1) wird der Einfluss der Stahlqualität veranschaulicht (Abbildung 4.15). Durch Einsatz eines höherwertigen Stahls ändert sich die Mindestzugspannung $\sigma_{\text{comp,min}}$ nicht (Abbildung 4.15). Allerdings sind die Fließspannungen und die Bruchspannungen entsprechend erhöht.

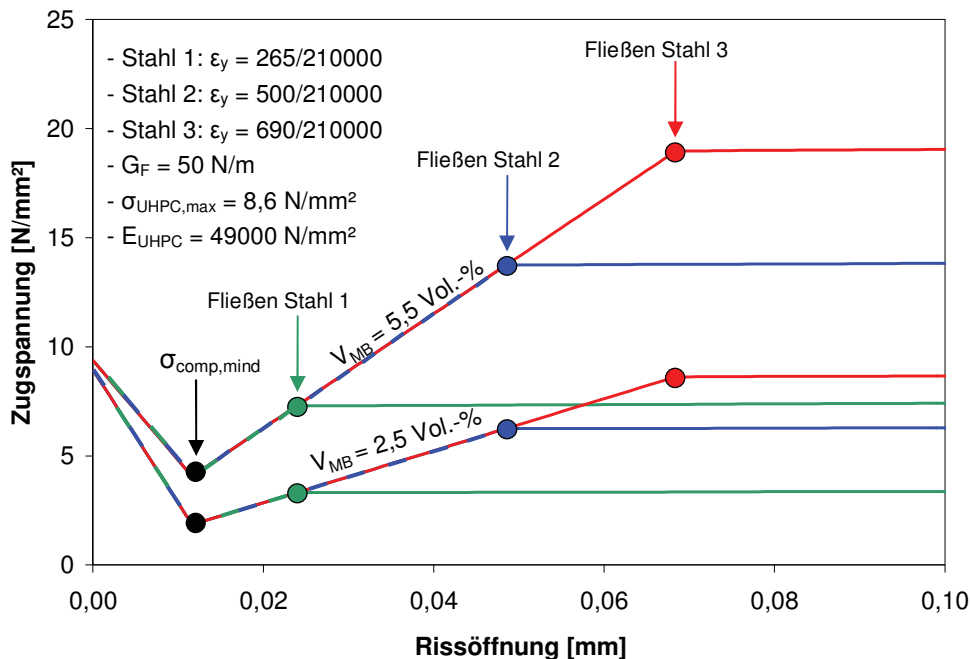


Abbildung 4.15: Einfluss der Stahlgüte der Mikrobewehrung auf die Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung des mikrobewehrten UHPC (bis Rissöffnung 0,1 mm)

Von einem "überkritischen" Mikrobewehrungsgehalt (analog zu UHPC mit Mikrodrahtfasern) kann gesprochen werden, sobald die Spannung des Verbundquerschnitts die Erstrissspannung überschreitet. Für mikrobewehrten UHPC wird dabei zusätzlich unterschieden, ob die Erstrissspannung unterhalb der Bruchspannung oder der Fließspannung liegt. Abbildung 4.15 zeigt exemplarisch den Einfluss einer Variation des Stahltyps für einen mittleren und einen hohen Mikrobewehrungsgrad. Während für Stahltyp 1 die Fließspannung der Mikrobewehrung unterhalb der Erstrissspannung liegt, kann bei einem Mikrobewehrungsgehalt von 5,5 Vol.-% die Erstrissspannung sowohl für die Stahltypen 2 und 3 gesteigert werden. Für diesen Fall ist eine Mehrfachrissbildung des Zugkörpers entlang der Bauteilachse möglich. Eine Auswertung über mehrere Mikrobewehrungsgehalte zeigt, dass für Stahl 1 5,0 Vol.-%, für Stahl 2 3,5 Vol.-% und für Stahl 3 2,5 Vol.-% Mikrobewehrungsgehalt erforderlich sind, um die Erstrisskraft bis zum Bruch des Zugkörpers zu steigern.

Für den Fall, dass die Erstrisskraft unter der Fließkraft liegen soll sind für Stahl 1 7,5 Vol.-%, Stahl 2 4,0 Vol.-% und Stahl 3 3,0 Vol.-% Mikrobewehrungsgehalt erforderlich.

Diese Übersicht zeigt, dass es im Sinne einer möglichst guten Rissverteilung sinnvoll ist, die leistungsstarke UHPC-Matrix mit einer Mikrobewehrung einer hochwertigen Stahlsorte zu kombinieren.

Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass höherfeste Drähte in der Regel ein weniger ausgeprägtes duktileres Verhalten aufweisen und somit je nach Einsatzzweck eine entsprechende Stahlsorte zu wählen ist.

c) Maschenweite

Abbildung 4.16 zeigt durch Auswertung der Gleichungen (4.14) und (4.15) für verschiedene Maschenweiten und Mikrobewehrungsgehalte den Einfluss der Maschenweite und des Mikrobewehrungsgehaltes auf die Mindestzugspannung $\sigma_{\text{comp, mind}}$. Neben der erwarteten Steigerung der Mindestzugspannung des Verbundmaterials $\sigma_{\text{comp, mind}}$ durch Erhöhung des Mikrobewehrungsgehaltes führt insbesondere die Reduktion des Abstandes der Querdrähte zu einer höheren Mindestzugspannung. Diese Erhöhung resultiert aus der Lasteinleitungslänge l_e , die für die vorliegende Variation der einfachen bis doppelten Maschenweite entspricht. Bei einer kürzeren Lasteinleitungslänge stellt sich eine höhere Dehnung der Mikrobewehrung bei Erreichen der Rissbreite $w_{\text{UHPC, max}}$ ein. Diese höhere Dehnung hat wiederum eine größere zugehörige Spannung $\sigma_{\text{comp, mind}}$ zur Folge.

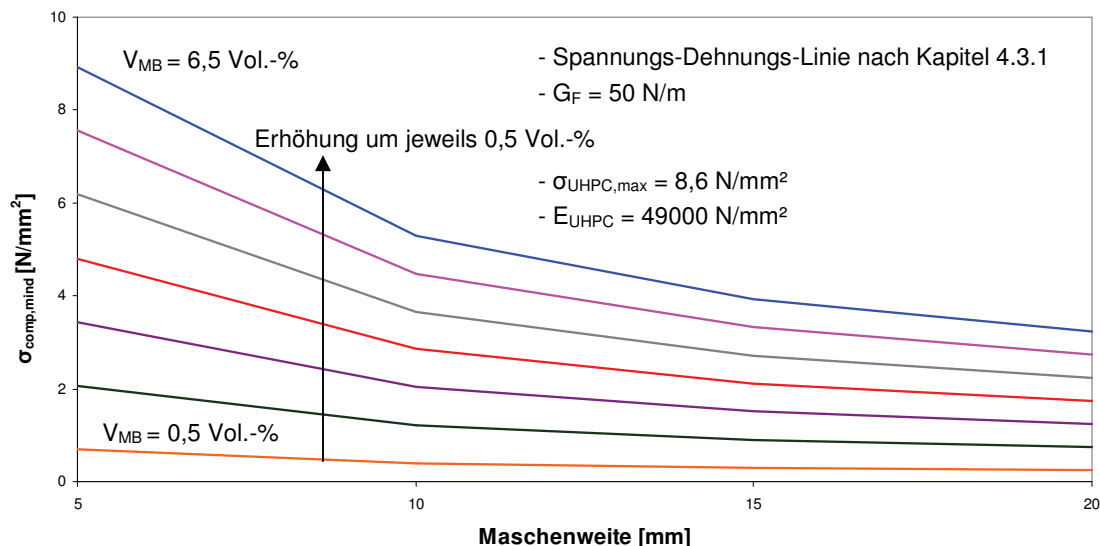


Abbildung 4.16: Einfluss der Maschenweite und des Mikrobewehrungsgehaltes auf die Mindestzugfestigkeit

Bei einem überkritischen Bewehrungsgehalt resultieren für kleinere Maschenweiten geringere Rissabstände und damit in der Folge geringere Rissbreiten.

d) Durchmesser

Der Durchmesser ist bei konstantem Stahlgehalt direkt an die Maschenweite gekoppelt. Für größere Durchmesser ergeben sich für konstante Stahlgehalte größere Maschenweiten, sodass Abbildung 4.16 indirekt auch den Einfluss einer Variation des Durchmessers darstellt.

e) Entfestigungsgesetz der Matrix und Bruchenergie

Je nach Ansatz des Entfestigungsverhaltens der UHPC-Matrix resultieren bei konstanter Bruchenergie stark abweichende Mindestzugspannungen. Zur Veranschaulichung des Einflusses des Entfestigungsverhaltens ist in Abbildung 4.18 neben dem in dieser Arbeit angesetzten linearen Entfestigungsverhalten auch die Entfestigung nach den Ansätzen von Hordijk, Cornelissen und Reinhardt [CoHo86] angegeben (Abbildung 4.17 und Gleichung (4.16)).

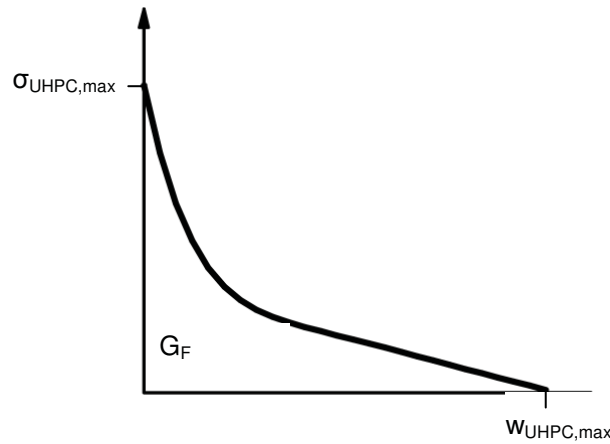


Abbildung 4.17: Entfestigungsverhalten nach [CoHo86], adaptiert für UHPC

$$\sigma_{\text{UHPC}}(w) = \sigma_{\text{UHPC,max}} \cdot \left(1 + \left(c_1 \cdot \frac{w}{w_{\text{UHPC,max}}} \right)^3 \right) \cdot e^{\left(-c_2 \cdot \frac{w}{w_{\text{UHPC,max}}} \right)} - \frac{w}{w_{\text{UHPC,max}}} \cdot (1 + c_1^3) \cdot e^{-c_2} \quad (4.16)$$

Mit

$$c_1 = 3,0$$

$$c_2 = 6,93$$

$$w_{\text{UHPC,max}} = 5,136 \cdot \frac{G_F}{\sigma_{\text{UHPC,max}}} = 5,136 \cdot \frac{0,05}{8,6} = 0,030 \text{ mm}$$

Die maximale Rissöffnung $w_{\text{UHPC,max}}$, bis zu welcher der UHPC noch Kräfte übertragen kann, beträgt für den Ansatz der linearen Entfestigung 0,012 mm und für eine Entfestigung nach Hordijk 0,030 mm. Während die Mikrobewehrung für eine Rissöffnung $w_{\text{UHPC,max}} = 0,012 \text{ mm}$ noch ein lineares Materialverhalten aufweist, ist zu einer Rissöffnung von 0,030 mm bereits die Fließdehnung überschritten und die zugehörige Spannung in der Mikrobewehrung entsprechend hoch. Aus diesem Grund ist die Mindestzugspannung $\sigma_{\text{comp, mind}}$ für das Entfestigungsverhalten nach Hordijk höher, als diese für den Ansatz eines linearen Entfestigungsverhaltens.

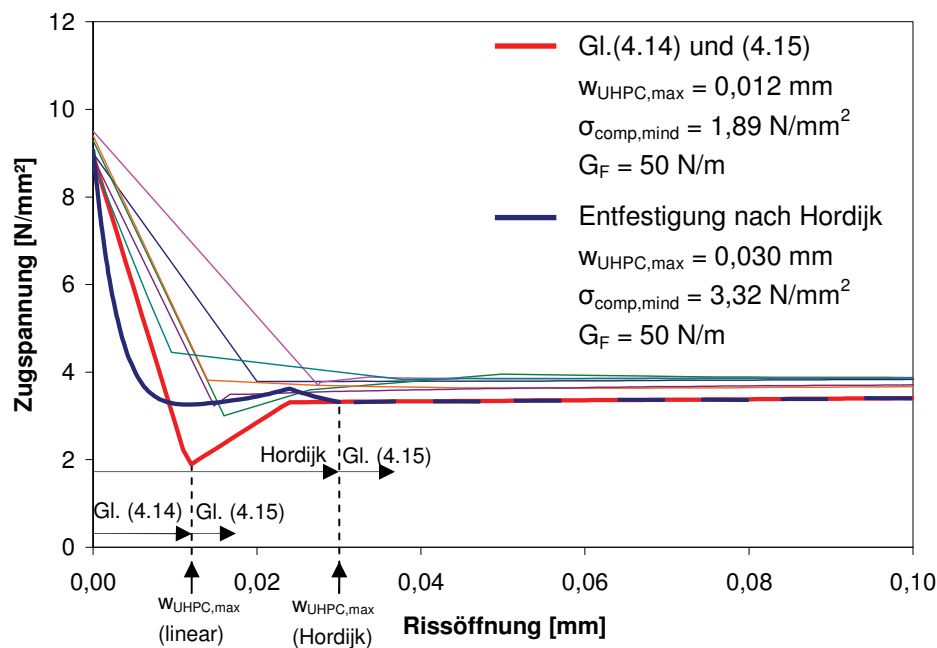


Abbildung 4.18: Einfluss des Entfestigungsverhaltens auf die Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung

Der berechnete Kurvenverlauf mit dem Entfestigungsgesetz nach Hordijk weicht bis zu einer Rissöffnung von ca. 0,01 mm stärker von den Versuchsergebnissen ab als dieser unter Ansatz des linearen Entfestigungsverhaltens. Ab einer Rissöffnung von 0,01 mm

nähert sich die Kurve nach Hordijk jedoch besser an die Versuchsergebnisse an als die lineare Funktion. Vor dem Hintergrund des Ansatzes der Mindestzugspannung in der Bemessung mikrobewehrter UHPC-Bauteile wird auf der sicheren Seite liegend für den spröden unbewehrten feinkörnigen UHPC der lineare Ansatz der Entfestigung zur Bestimmung der Mindestzugspannung des Verbundmaterials $\sigma_{\text{comp, mind}}$ gewählt.

Der Einfluss einer Variation der Bruchenergie ist in Abbildung 4.19 für das lineare Entfestigungsverhalten dargestellt. Mit steigender Bruchenergie und gleichbleibender Matrixzugfestigkeit folgt eine größere Rissöffnung $w_{\text{UHPC, max}}$ und in der Folge durch eine größere zugehörige Dehnung und Spannung der Mikrobewehrung eine höhere Mindestzugfestigkeit.

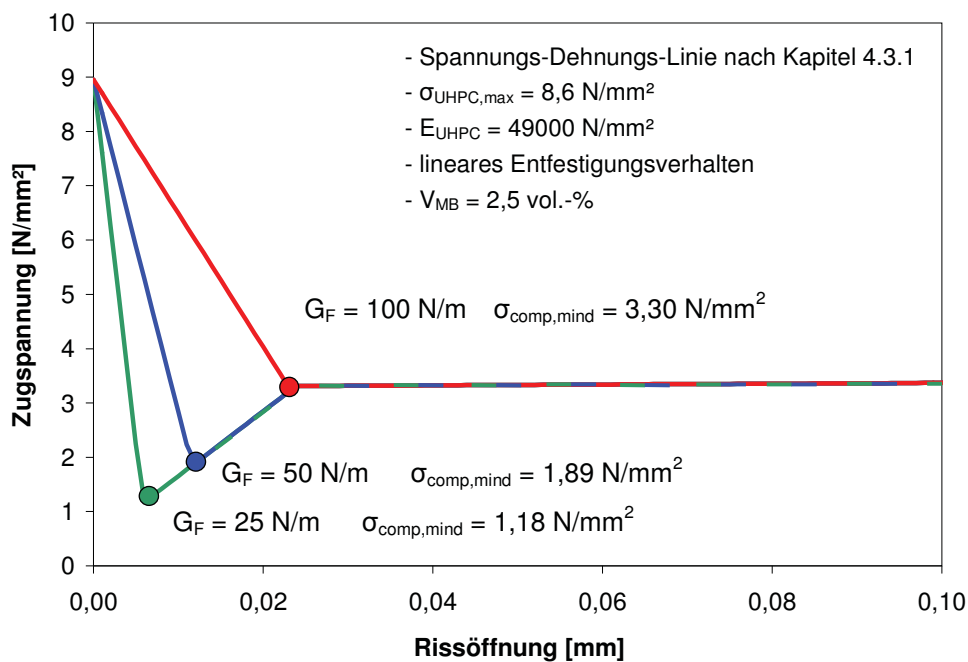


Abbildung 4.19: Einfluss der Bruchenergie auf die Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung

4.4 Reine Biegung

4.4.1 Allgemeines

Die nachfolgenden Ausführungen zum Biegetragverhalten setzen folgende Annahmen voraus:

- Bernoulli Hypothese: ebene Querschnitte bleiben auch nach Verformung eben. Die Dehnungsverteilung über die Querschnittshöhe ist linear.
- Es herrscht starrer Verbund zwischen dem UHPC und der Mikrobewehrung, d.h., es treten keine Relativverschiebungen zwischen beiden Materialien auf. Dies ist infolge der als Verankerung wirkenden Querdrähte eine realitätsnahe Annahme.
- Grundlage der Ermittlung des Tragverhaltens bildet die Gleichgewichtsbetrachtung unter Ansatz der Stoffgesetze.

Ein Einfluss des Schwindens wird nicht berücksichtigt. Dieser sollte jedoch aufgrund der gleichmäßig verteilten Bewehrung über den Querschnitt gering sein.

Auch bei der Beschreibung des Biegetragverhaltens wird wie zuvor in Kapitel 4.3.4 eine Analogie zum Stahlbeton hergestellt. In der Regel wird im Stahlbetonbau zur Darstellung des Verformungsverhaltens infolge Biegung eine Momenten-Krümmungs-Beziehung verwendet (Abbildung 4.20).

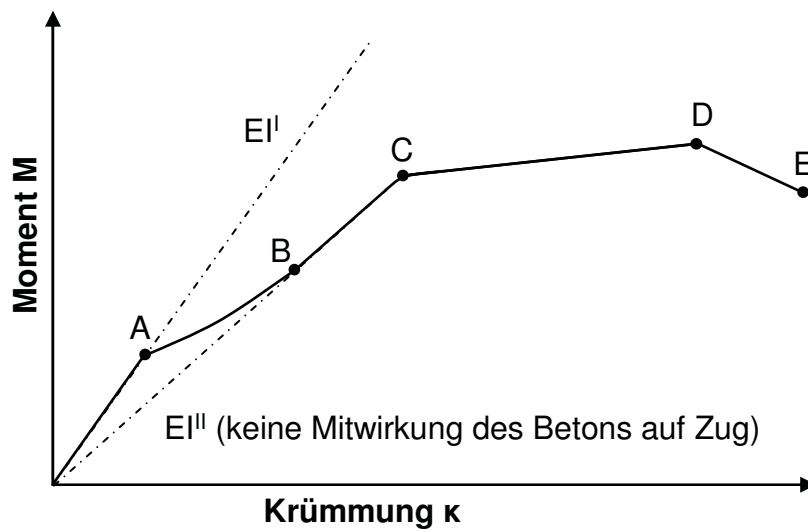


Abbildung 4.20: Schematische Darstellung Momenten-Krümmungs-Beziehung Stahlbeton

Üblicherweise wird die Momenten-Krümmungs-Beziehung durch fünf markante Punkte beschrieben:

- Punkt A: Rissmoment - linear elastisches Verhalten bis zu diesem Punkt
- Punkt B: Steifigkeitsreduktion durch Rissbildung und damit Zunahme der Krümmung bei steigendem Moment infolge Mitwirken des Betons auf Zug.
- Punkt C: Fließmoment
- Punkt D: Bruchmoment
- Punkt E: Versagen des Biegebalkens

4.4.2 Zustand I

Für den ungerissenen Querschnitt gelten zunächst die allgemeinen linearen Zusammenhänge

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (4.17)$$

und

$$\kappa = \frac{M}{E \cdot I} \quad (4.18)$$

Aufgrund der unterschiedlichen Steifigkeiten von UHPC und Mikrobewehrung werden hierbei ideale Querschnittswerte (A_{ideell} und I_{ideell}) berücksichtigt. Unter Voraussetzung einer gleichmäßigen Verteilung der Mikrobewehrung über die Höhe des Querschnitts sind die Ordinaten der Schwerpunkte mikrobewehrter und unbewehrter Querschnitte identisch.

Für einen Rechteckquerschnitt berechnet sich das ideale Trägheitsmoment zu:

$$I_{\text{ideell}} = \frac{bh^3}{12} + (\alpha - 1) \sum_{i=1}^n A_{\text{MBi}} \left(\frac{h}{2} - d_{\text{MBi}} \right)^2 \quad (4.19)$$

mit

$$\alpha = \frac{E_{\text{MB}}}{E_{\text{UHPC}}} \quad (4.20)$$

wobei der Index "MB" jeweils die Mikrobewehrung und der Index "UHPC" die UHPC-Matrix kennzeichnet.

Unter reiner Biegebeanspruchung kann die Spannung im UHPC nach Gleichung (4.21) berechnet werden.

$$\sigma_{\text{UHPC}(z)} = \frac{M \cdot z}{I_{\text{ideell}}} \quad (4.21)$$

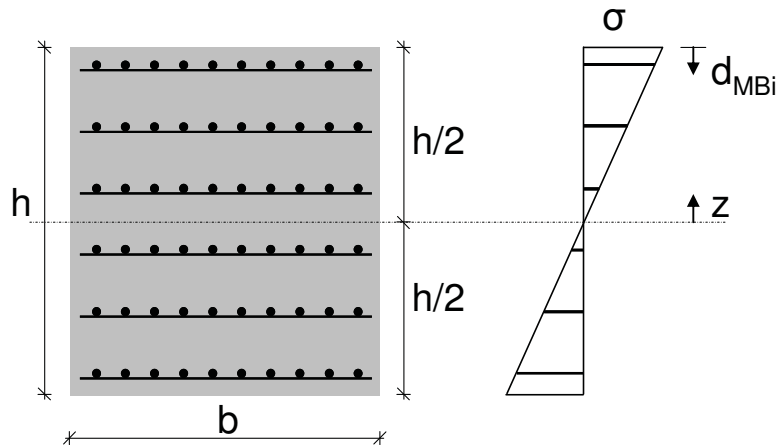


Abbildung 4.21: Spannung am ungerissenen mikrobewehrten UHPC-Querschnitt

Die Spannung in den einzelnen Mikrobewehrungslagen für den ungerissenen Querschnitt bestimmt sich zu

$$\sigma_{\text{MBi}} = \frac{M \cdot z_{\text{MBi}}}{I_{\text{ideell}}} \cdot \alpha \quad (4.22)$$

Das Rissmoment M_{cr} (Punkt A nach Abbildung 4.20) ergibt sich für Einsetzen der Betonzugfestigkeit $\sigma_{\text{UHPC,max}}$ in Gleichung (4.21) und $z = h/2$ entsprechend der äußersten Randfaser des Querschnitts.

Der tatsächliche Spannungsverlauf berücksichtigt allerdings ein Mitwirken des Betons auf Zug (Abbildung 4.22), sodass das Rissmoment nach dem oben beschriebenen Vorgehen unterschätzt wird. Zwar beginnt ab Erreichen des Rissmomentes M_{cr} der Prozess der Mikrorissbildung, sodass die Steifigkeit geringfügig reduziert wird (was im Momenten-Krümmungs-Diagramm des mikrobewehrten UHPC nahezu nicht zu erkennen ist), jedoch kann bis zur Bildung des ersten Risses das Moment weiter gesteigert werden. Das auf diese Weise bestimmte Rissmoment M_{cr}^* hängt dabei stark von der angesetzten Entfestungskurve ab.

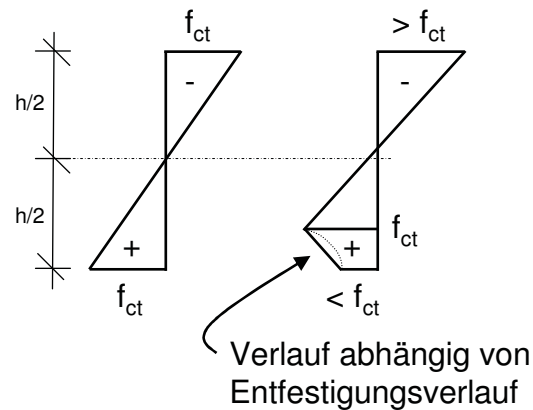


Abbildung 4.22: Spannungsverteilung bei Rissmoment nach [Du91]

Die zugehörige Verkrümmung im Zustand I ergibt sich über

$$\kappa_I = \frac{\epsilon_{MB,I} - \epsilon_{UHPC,I}}{d} \quad (4.23)$$

4.4.3 Zustand II

Nach Erreichen des Rissmomentes erfolgt die Kraftübertragung über die Mikrobewehrung und einen reduzierten Betonquerschnitt. Infolge zunächst unbekannter Dehnungsverteilung und damit unbekannter Druckzonenhöhe x kann der Tragwiderstand nicht direkt ermittelt werden. Die Dehnungsverteilung ist daher wie im Stahlbetonbau iterativ zu ermitteln bis die Gleichgewichtsbedingung am Querschnitt (Abbildung 4.23) nach Gleichung (4.24) erfüllt ist.

$$\sum F_T = \sum F_C \quad (4.24)$$

Mit

$\sum F_T$ Summe aller Zugkräfte (tension)

$\sum F_C$ Summe aller Druckkräfte (compression)

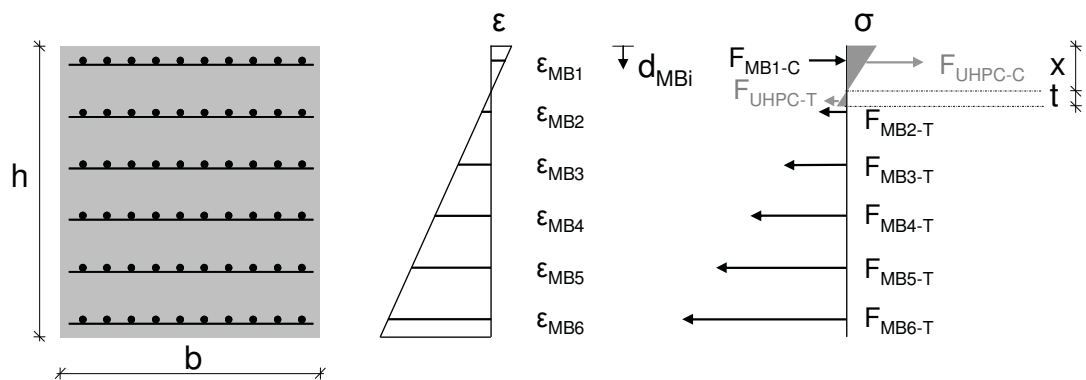
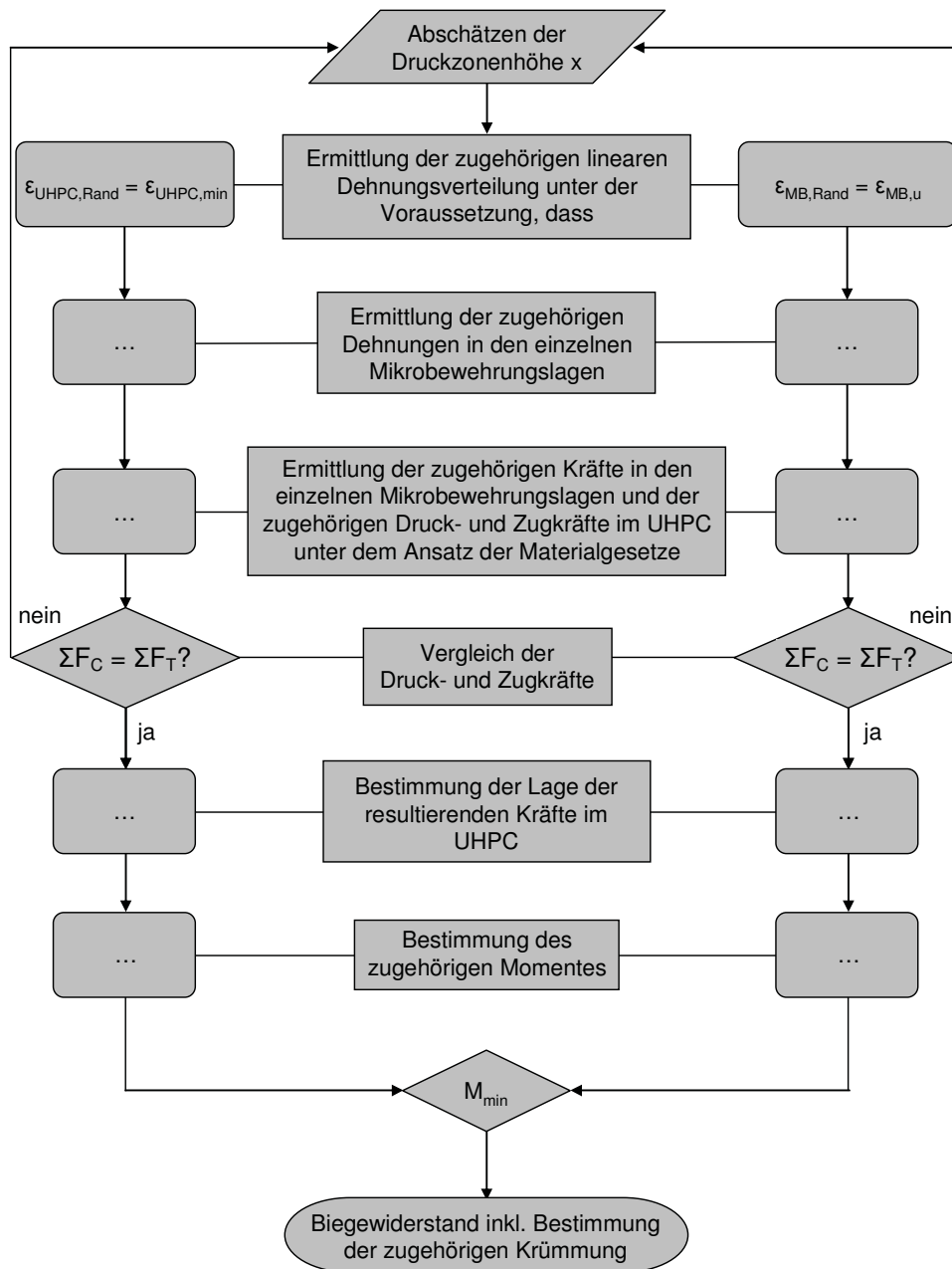


Abbildung 4.23: Dehnungs- und Spannungsverteilung sowie Kräfte am gerissenen mikrobewehrten UHPC-Querschnitt

In Abbildung 4.24 ist das Fließschema zur Berechnung des Biegewiderstandes im Zustand II unter voller Ausnutzung des UHPC angegeben. Für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersuchten Mikrobewehrungsgehalte ($\geq 2,4$ Vol.-%) wird ein Reißen der Mikrobewehrungsdrähte aufgrund der hohen Bruchdehnung der Drähte im Vergleich zur geringen Bruchstauchung der UHPC-Matrix nicht maßgebend. Bei Verwendung eines höherfesten Drahtes mit geringerer Bruchdehnung ist das Mikrobewehrungsversagen vor Betondruckzonenversagen jedoch nicht auszuschließen.



rechnung des ideellen Trägheitsmomentes, hierbei allerdings für den gerissenen Querschnitt nach Gleichung (4.25) erforderlich.

$$I_{\text{ideell,cr}} = \frac{b(x+t)^3}{3} + (\alpha - 1) \sum_{i=1}^{n_{x+t}} A_{\text{MBi}} (x - d_{\text{MBi}})^2 + \alpha \sum_{i=n_{x+t}+1}^n A_{\text{MBi}} (d_{\text{MBi}} - x)^2 \quad (4.25)$$

Bei einem Kräftegleichgewicht besitzt die geschätzte Dehnungsverteilung Gültigkeit und das zugehörige Moment kann bestimmt werden.

Die Tragfähigkeit des gerissenen Querschnitts ist erreicht, wenn entweder die Bruchstauchung des UHPC oder die Bruchdehnung der Mikrobewehrung erreicht ist. Damit wird im Gegensatz zu stahlfaserbewehrtem UHPC das aufnehmbare Moment durch die Tragfähigkeit der einzelnen Verbundkomponenten (Mikrobewehrung und UHPC-Matrix) bestimmt.

In Tabelle 4.2 ist das Verhältnis von experimentell (M_{exp}) ermitteltem und berechnetem (M_{cal}) Maximalmoment für die in Kapitel 3 untersuchten Balken mit dem Mikrobewehrungstyp MB1 angegeben.

Tabelle 4.2: Vergleich der Maximalmomente aus Versuch und Berechnung, Mikrobewehrungstyp MB1

Mattenorientierung	Mikrobewehrungsgehalt [Vol.-%]	Verhältnis $M_{\text{cal}}/M_{\text{exp}}$
horizontal	2,6	0,88
	5,1	0,77
vertikal	2,6	0,82
	5,1	0,79

Die Gegenüberstellung zeigt, dass die berechneten Momente unabhängig von Orientierung und Mikrobewehrungsgehalt stets unterhalb der experimentell ermittelten Momente liegen. Für eine Ausrichtung der Mikrobewehrungsmatten horizontal und einem zu stahlfaserbewehrtem UHPC äquivalenten Stahlgehalt (2,6 Vol.-%) ist die Abweichung mit 12 % am geringsten. Eine Verdoppelung des Stahlgehaltes bringt hingegen größere Abweichungen mit sich. Ein Grund hierfür liegt in der Herstellung der Versuchskörper. Der hohe Mikrobewehrungsgehalt von 5,1 Vol.-% erfordert 53 Mikrobewehrungsmatten über die Höhe von 150 mm. Das entspricht einem Abstand der Matten von 2,78 mm.

Bei bereits geringen Abweichungen der Mattenabstände in der Zugzone (im Bereich von Zehntelsmillimetern) ergeben sich stark abweichende Maximalmomente (vgl. Abbildung 3.34). Trotz hoher Sorgfalt kam es beim Herstellen der Proben nach Entfernen der Abstandhalter auf dem Rütteltisch zu geringen Verschiebungen der Mikrobewehrungsmatten im frischen UHPC, was anhand von Sägeschnitten der geprüften Proben ersichtlich wird (Abbildung 4.25). Zusätzlich waren die Mikrobewehrungsmatten im Liefer- und Lagerzustand über die Breite von einem Meter aufgerollt, was eine teilweise Krümmung der geschnittenen Matten bewirkte.

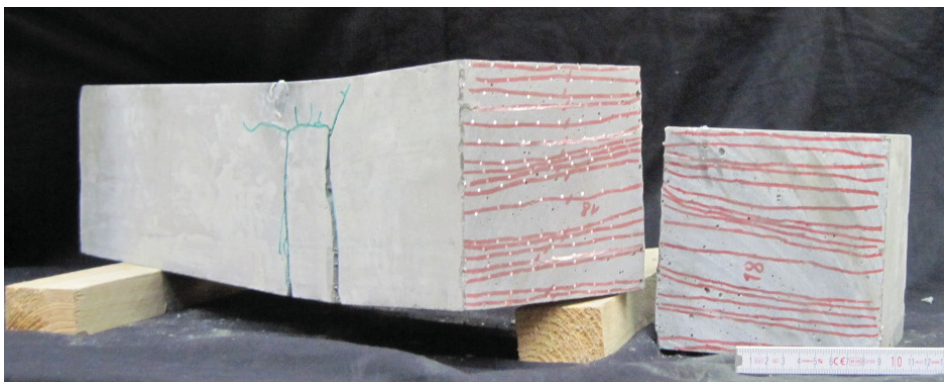


Abbildung 4.25: Sägeschnitt des Balkens MB3-2,5-4-h

Ein weiterer Grund der Abweichung liegt in der Begrenzung der Stauchung des UHPC auf 3,3 Promille. Diese Begrenzung wurde aus der Bruchstauchung des unbewehrten UHPC im zentrischen Druckversuch entnommen (Kapitel 3.4.2). Eine mögliche Erhöhung der Bruchstauchung durch die Mikrobewehrungsmatten in der Druckzone bis zu deren Druckversagen wird im rechnerischen Ansatz nicht berücksichtigt. Zusätzlich zu den aufgeführten Punkten ist anzuführen, dass die Bruchlast für diverse Balken auch nach maßgeblichen Schädigungen der Druckzone im Versuch weiter gesteigert werden konnte (siehe auch Abbildung 3.44), was ebenfalls im rechnerischen Ansatz unberücksichtigt bleibt.

Eine Anordnung der Mikrobewehrungsmatten vertikal in Kombination mit einem Bewehrungsgehalt von 2,5 Vol.-% liefert beim Vergleich der Maximalmomente eine Abweichung von 18 %, die mit steigendem Bewehrungsgehalt auf 21 % ansteigt. Für diese Anordnung ist eine Verschiebung der Mikrobewehrungsmatten im Querschnitt von untergeordneter Bedeutung, da diese einen deutlich geringeren Einfluss auf die Abstände der Längsbewehrung in der Zugzone besitzt; diese Abstände sind durch die Maschen-

weiten vorgegeben. Auch hier wird die Abweichung der maximal aufnehmbaren Kraft zwischen Versuch und Handrechnung zum einen mit der konservativen Annahme der Bruchstauchung der Druckzone von 3,3 Promille begründet und zum anderen mit einer Laststeigerung auch nach einer Schädigung der Druckzone. Während die Mikrobewehrungsmatten bei horizontaler Ausrichtung und zu großer Stauchung ausknicken, kommt es für eine vertikale Ausrichtung lediglich zu Abplatzungen des UHPC bis auf die Vertikaleisen. Die äußerste Faser der Druckzone wandert dann vom ehemals vorhandenen oberen Querschnittsrand nach unten bis auf die Oberseite der Vertikaleisen, was zu einer vergrößerten Dehnung der Mikrobewehrungsdrähte der Zugzone und Spannungszunahme bis zu deren Versagen führt.

Die Berechnung der Maximalmomente für beide Ausrichtungen (vertikal und horizontal) ist exemplarisch in Anhang B2 für einen Mikrobewehrungsgehalt von 2,6 Vol.-% dargestellt.

Für die weiteren Mikrobewehrungstypen (MB3, MB4 und MB5) ist ein Vergleich von berechneten und experimentell ermittelten Maximalmomenten bzw. Maximalkräften in Tabelle B 3.1 (Anhang B3) angegeben. Die in Tabelle 4.2 für den Mikrobewehrungstyp MB1 angegebenen Verhältniswerte M_{cal}/M_{exp} sind dabei im wesentlichen vergleichbar zu den in Anhang B3 aufgelisteten Quotienten.

Verformungen

Mit dem im vorliegenden Kapitel beschriebenen Vorgehen können die charakterisierenden Momente der Momenten-Krümmungs-Linie (Abbildung 4.20 und Abbildung 4.26) für mikrobewehrte UHPC-Querschnitte bestimmt werden. In Kapitel 4.3.4 wurde bereits für den mikrobewehrten Zugstab (mit einem Stahlgehalt vergleichbar zu mikrodrahtfaserbewehrten Proben) erläutert, dass es in der Kraft-Verformungs-Linie aufgrund des geringen Anteils an Längsbewehrung in Kombination mit der hohen Zugfestigkeit der UHPC-Matrix und der geringen Bruchenergie zu einem Kraftabfall nach Erreichen der Risskraft kommt. Auch für eine Biegebeanspruchung ist nach dem Rissmoment (Punkt A) bei einem Stahlgehalt von rund 2,5 Vol.-% und der vorliegenden Stahlgüte S235 eine "negative Steifigkeit" in der Momenten-Krümmungs-Linie vorhanden. Die Neigung des Steifigkeitsverlustes hängt dabei vom Mitwirken des UHPC auf Zug ab. Für die in Kapitel 4.3.4 gewählte lineare Spannungs-Dehnungs-Linie bzw. Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung ergibt sich in der Momenten-Krümmungs-Beziehung ein relativ steiler Abfall. Ab dem Punkt B ist die Rissweite so stark angewachsen, dass der UHPC keinen Beitrag zum Lastabtrag der Zugkräfte leistet. Übliche Bewehrungsgehalte

im Stahlbetonbau verhindern einen solchen Abfall, Fließ- wie auch Bruchmoment liegen normalerweise über dem Rissmoment ("Mindestbewehrung zur Gewährleistung eines duktilen Bauteilversagens"). Aufgrund der vergleichsweise hohen Zugfestigkeit der UHPC-Matrix und dem damit verbundenen hohen Rissmoment, in Kombination mit einer Mikrobewehrung geringer Stahlgüte, ist ein hoher Stahlgehalt zur Abdeckung des Fließmomentes erforderlich. Abhilfe schafft hier die Verwendung eines hochfesten Stahls für die Mikrobewehrung.

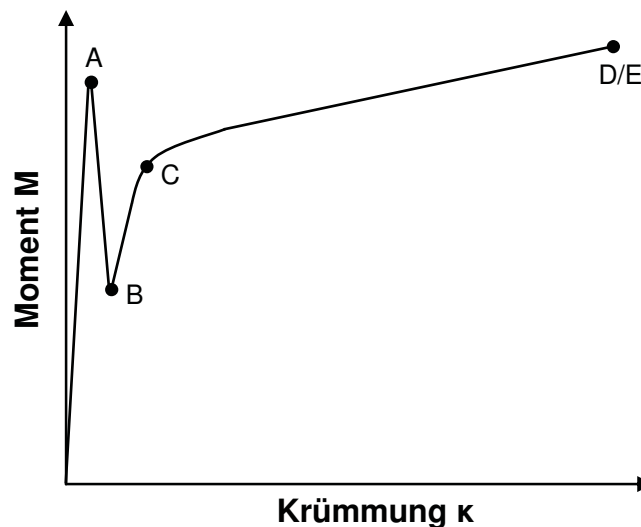


Abbildung 4.26: Momenten-Krümmungs-Beziehung für einen mikrobewehrten UHPC-Querschnitt mit geringem Stahlgehalt (kennzeichnende Punkte gemäß Abbildung 4.20)

Mit der zweifachen Integration der Krümmung über die Bauteillänge lässt sich ganz allgemein die Biegelinie eines Balkens bestimmen, wobei die Schubverformungen üblicherweise vernachlässigbar sind.

$$w''(x) = -\kappa(x) = \frac{M(x)}{EI(x)} \quad (4.26)$$

$$w(x) = -\int \int \frac{M(x)}{EI(x)} dx dx + a_1 x + a_2 \quad (4.27)$$

Während die Berechnung der kennzeichnenden Momente über die im vorliegenden Kapitel angegebenen Gleichungen mit vertretbarem Aufwand möglich ist, gestaltet sich die Ermittlung der Krümmung ab Punkt A schwierig. Durch das Auftreten mehrerer Risse

entlang der Balkenachse ist die Steifigkeit des Bauteils reduziert. Eine genaue Berechnung der Krümmung setzt zum einen die genaue Kenntnis über die Rissabstände, Riss-tiefe und Rissverteilung entlang des Balkens voraus, zum anderen den Anteil des Mit-wirkens des UHPC zwischen den Rissen in der Zugzone. Infolge dieser beanspru-chungsabhängigen Biegesteifigkeit im Zustand II ist die Krümmung nicht mehr propor-tional zur Momentenbeanspruchung.

Die Krümmungen im reinen Zustand I und im reinen Zustand II können wie folgt ermit-telt werden:

$$\kappa_I(x) = \frac{\varepsilon_{MB,I}(x) - \varepsilon_{UHPC,I}(x)}{d} \quad (4.28)$$

$$\kappa_{II}(x) = \frac{\varepsilon_{MB,II}(x) - \varepsilon_{UHPC,II}(x)}{d} \quad (4.29)$$

$\varepsilon_{MB,II}$ kennzeichnet dabei die Dehnung in der Mikrobewehrungslage am äußersten Zug-rand und d den Abstand von dieser Lage bis zum äußersten gedrückten Rand.

Zur Berechnung der Durchbiegungen werden daher im nachfolgenden Kapitel 5 nichtli-neare finite Elemente Untersuchungen durchgeführt, die die Steifigkeitsänderung durch Rissbildung entlang der Balkenachse berücksichtigen.

Kapitel 5

Numerische Untersuchungen

5.1 Allgemeines

Finite Elemente Berechnungen erlauben die Durchführung umfassender Parameterstudien, ohne einen im Vergleich zu experimentellen Untersuchungen großen finanziellen und zeitlichen Aufwand. Allerdings ist zur wirklichkeitsnahen Beschreibung des Trag- und Verformungsverhaltens die physikalische Nichtlinearität des Verbundwerkstoffes entsprechend zu berücksichtigen und die Materialmodellierung unter Verwendung von Ergebnissen experimenteller Untersuchungen vorzunehmen. Im vorliegenden Fall wird auf die in Kapitel 3 beschriebenen Ergebnisse zurückgegriffen.

Das im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendete Finite Elemente Programm TNO DIANA verfügt über eine umfangreiche Auswahl an Element- und Materialtypen. Untersuchungen, das Materialverhalten von Bauteilen aus herkömmlichem Stahlbeton realitätsnah abzubilden, wurden u. a. in [Ne06, Al08, FeBo93, Mi87] erfolgreich vorgenommen.

5.2 Materialmodelle und Rechenkonzept

Ingenieurmäßige Idealisierungen erfordern in der Regel aufgrund von Grenzbetrachtungen keine genaue mathematische Abbildung des Materialverhaltens. Der materialinterne Energiehaushalt sowie dessen detaillierte Beschreibung sind jedoch bei der Berücksichtigung wirklichkeitsnaher Stoffgesetze in Finite Elemente Berechnungen von Bedeutung. Die Abbildung des Bruchzustandes ist beispielsweise nur durch ein entsprechend zugewiesenes Entfestigungsverhalten möglich.

Im Gegensatz zur Berechnung von faserbewehrtem UHPC, bei dem nur ein einziges Materialmodell für den Verbundwerkstoff angesetzt wird, kommen im Rahmen der nachfolgend vorgestellten Untersuchungen separate Materialmodelle für den unbewehrten UHPC und die Mikrobewehrung zum Einsatz. Dabei werden Mikrobewehrung und UHPC unabhängig voneinander entsprechend der Ergebnisse der Einzelversuche aus Kapitel 3 modelliert.

Rechenkonzept

Zur Berücksichtigung der Rissbildung und Plastifizierung des mikrobewehrten UHPC wird das Total-Strain-Konzept, basierend auf der modifizierten Druckfeldtheorie („Modified Compression Theory“) von Vecchio und Collins [VeCo86] verwendet. Hierbei wird von einer verschmierten Rissbildung ausgegangen, d.h., der gerissene Beton wird durch Berechnung von Durchschnittsspannungen und -dehnungen als kontinuierliches Material betrachtet. Sobald die Hauptspannungen in den Integrationspunkten die Zugfestigkeit des UHPC erreichen, wird die Steifigkeit der betroffenen Elemente reduziert. Bei diesem Verfahren entsteht kein diskreter Riss mit messbarer Rissbreite. Zur Bestimmung des globalen Tragverhaltens ist diese "verschmierte Rissbildung" jedoch ausreichend genau.

Innerhalb des beschriebenen Total-Strain-Konzeptes wird weiter zwischen den Ansätzen "Total-Strain-Rotating-Crack" und "Total-Strain-Fixed-Crack" unterschieden. Während die Rissrichtung im Rotating Crack Model bedingt durch die Änderung der Hauptspannungsrichtungen in den Gauß'schen Integrationspunkten veränderlich ist, bleibt sie im Fixed Crack Model, von Beginn der Mikrorissbildung an, an ein unverändertes Koordinatensystem angepasst. Die sich ändernde Rissrichtung im Rotating Crack Model bedingt ein veränderliches Rissbild, bei dem während dessen Verschiebung aufgetretene Risse geschlossen werden, während neue Risse entstehen. Ein Nachfahren der in Kapitel 3 erzielten Versuchsergebnisse ist unter Anwendung dieser Methode nicht möglich. Daher wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit das "Total-Strain-Fixed-Crack Model" mit fester und zueinander orthogonaler Rissrichtung verwendet.

Die entsprechenden Materialmodelle für den Druck- und Zugbereich des UHPC sowie den der Mikrobewehrung werden über zugehörige Spannungs-Dehnungs-Linien vorgegeben. Während das Materialverhalten der Mikrobewehrung über einzelne Wertepaare als so genannte „multilineare Funktion“ berücksichtigt wird, wird für den unbewehrten

UHPC auf in der Materialbibliothek von DIANA implementierte Materialmodelle zurückgegriffen.

5.2.1 UHPC

Druck

Anhand der durchgeführten Versuche (Kapitel 3) und der analytischen Beschreibung (Kapitel 4.2) liegt das Spannungs-Dehnungs-Verhalten für unbewehrten UHPC unter einer Druckbeanspruchung vor. Die Abbildung dieses Materialverhaltens in DIANA erfolgt über die in der Materialbibliothek von DIANA [DIA09] vorhandene Funktion nach Thorenfeldt et al. [ThTJ87] (Abbildung 5.1, Gleichung (4.1)). Die Zylinderdruckfestigkeit f_{ck} ist zu 150 N/mm^2 und der E-Modul (Tangentenmodul im Ursprung E_{ci}) zu 49.000 N/mm^2 angesetzt.

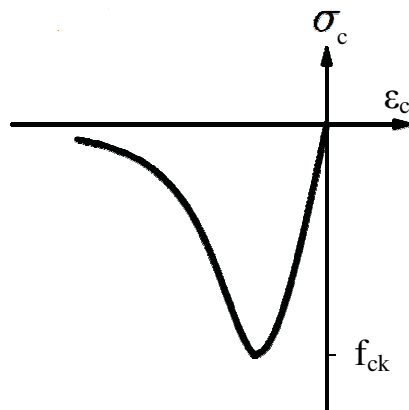


Abbildung 5.1: Materialverhalten nach Thorenfeldt [ThTJ87]

Der Einfluss der Rissbildung senkrecht zur Druckbeanspruchungsebene auf die einaxiale Druckfestigkeit kann in DIANA berücksichtigt werden. Auf Basis des Ansatzes nach Vecchio und Collins [VeCo93] wird die einaxiale Druckfestigkeit f_{ck} in Abhängigkeit der Querkzugdehnung ϵ_{c1} abgemindert (Abbildung 5.2 und Gleichung (5.1)).

$$f_{c2,max} = \frac{f_{ck}}{0,8 + 170 \cdot \varepsilon_{c1}} \quad (5.1)$$

Mit

$f_{c2,max}$ abgeminderte Druckfestigkeit

f_{ck} einaxiale Zylinderdruckfestigkeit,

ε_{c1} Hauptquerzugdehnung.

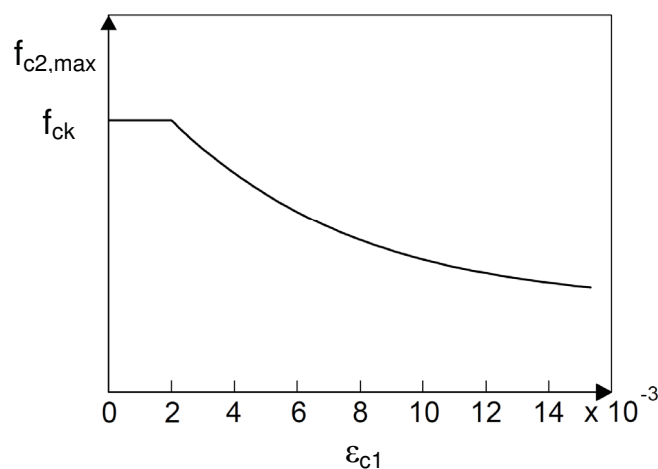


Abbildung 5.2: Reduktion der Druckfestigkeit nach [VeCo93]

Die durch die zweiaxiale Druckbeanspruchung erhöhte Festigkeit des UHPC wird gemäß dem Ansatz nach Drucker-Prager [DrPr52] in der Berechnung berücksichtigt.

Zug

Zur Modellierung des Materialverhaltens im Zugbereich wird den nicht-linearen Berechnungen die aus den experimentellen Untersuchungen (Kapitel 3) resultierende Spannungs-Dehnungs-Linie zugrunde gelegt. In den Versuchen zeigte sich ein sprödes Materialverhalten ohne Entfestigung. Wie in Kapitel 3 bereits diskutiert, resultiert der steile Spannungsabfall nicht allein aus der fehlenden Kornverzahnung, sondern kann außerdem auf die geringe Steifigkeit der Prüfeinrichtung zurückgeführt werden. Unter idealen Prüfbedingungen ist von einem linearen entfestigenden Verhalten mit geringer Bruchenergie auszugehen [MaSW03]. Zur Modellierung des Zugtragverhaltens des un-

bewehrten UHPC wird daher auf ein in DIANA implementiertes Materialmodell mit Entfestigung zurückgegriffen (Abbildung 5.3). Die gewählte lineare Funktion (Gleichung (5.2)) erfordert neben der Festlegung der Materialzugfestigkeit die Vorgabe der Bruchenergie G_F . Die Bruchenergie als materialspezifische Größe entspricht der Energie, die beim Reißen einer Einheitsfläche freigesetzt wird. Sie ist proportional zu der durch die Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung begrenzte Fläche. Über die Eingabe der Bruchenergie wird das Maß der Sprödigkeit vorgegeben. Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Berechnungen von feinkörnigem UHPC wird G_F zu 50 N/m angesetzt, was einem vergleichsweise geringen Wert entspricht. Übliche Werte für Normalbeton sowie grobkörnigen UHPC liegen um 100 N/m. Die Zugfestigkeit der unbewehrten UHPC-Matrix ist gemäß den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen zu 8,6 N/mm² gewählt.

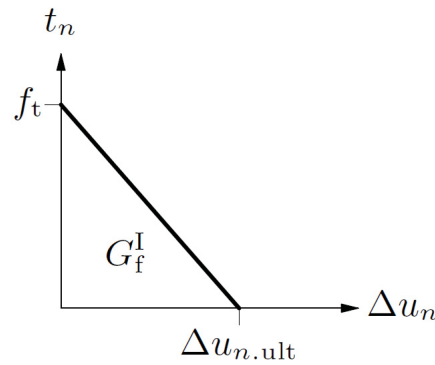


Abbildung 5.3: Entfestigungsverhalten des unbewehrten UHPC in DIANA [DIA09]

$$\frac{f_n(\Delta u_n)}{f_t} = \begin{cases} 1 - \frac{\Delta u_n}{\Delta u_{n,ult}} & \text{if } 0 < \Delta u_n < \Delta u_{n,ult} \\ 0 & \text{if } \Delta u_{n,ult} < \Delta u_n < \infty \end{cases} \quad (5.2) \quad [\text{DIA09}]$$

mit der maximalen Dehnung

$$\Delta u_{n,ult} = 2 \frac{G_f^I}{f_t} \quad (5.3) \quad [\text{DIA09}]$$

In Voruntersuchungen [ScPr11] wurde anstatt der linearen Entfestigungsfunktion ein sprödes Materialverhalten ohne Entfestigung für den Zugbereich angesetzt. Die resultierenden Ergebnisse beider Berechnungen weichen aufgrund der verhältnismäßig gerin-

gen Bruchenergie nur geringfügig voneinander ab. Die Berücksichtigung der Entfestigung führt jedoch zu einem stabileren Berechnungsverlauf.

5.2.2 Mikrobewehrung

Zur Abbildung des Materialverhaltens der einachsig belasteten Mikrobewehrung wird deren experimentell ermittelte Spannungs-Dehnungs-Linie herangezogen. Über den Befehl "multilin" können einzelne Wertepaare zur Beschreibung des Materialverhaltens explizit vorgegeben werden. In Abbildung 5.4 ist die vorgegebene Spannungs-Dehnungs-Linie dargestellt.

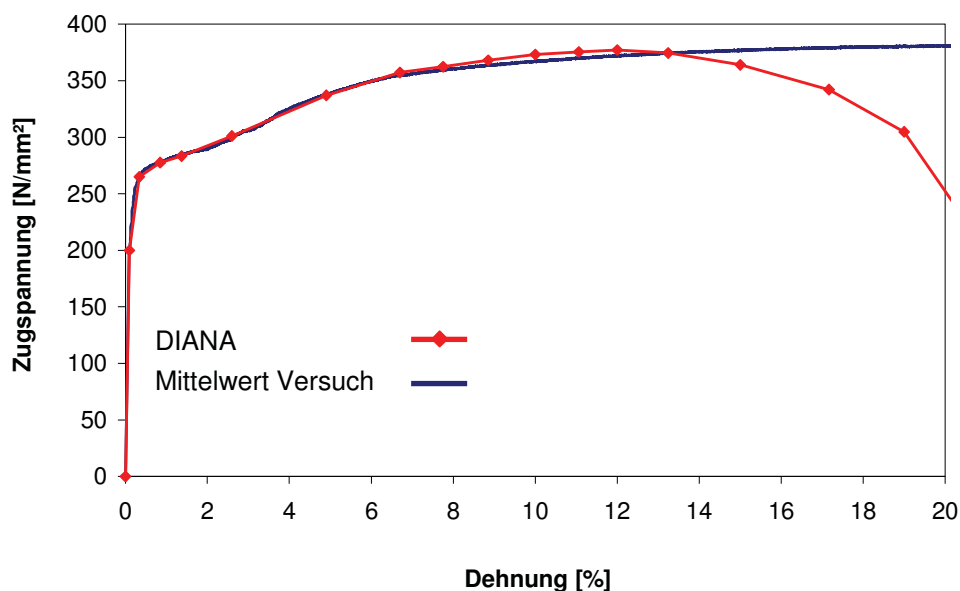


Abbildung 5.4: Spannungs-Dehnungs-Linie der Mikrobewehrung (DIANA u. Versuch)

In den experimentellen Untersuchungen konnte je nach Bewehrungsgehalt unter hohen Lasten und nach Schädigungen der Druckzone durch weitere Verformungszunahme ein Reißen der dünnen Mikrobewehrungsdrähte festgestellt werden. Zur Gewährleistung der Stabilität der Berechnung wurde das Versagen der Mikrobewehrung mit einer geringeren negativen Steigung als in der Realität abgebildet.

5.3 Modellierung und Berechnungsoptionen

5.3.1 Vorbemerkungen

Allgemeines

Um eine Bewehrung in DIANA zu berücksichtigen, stehen zwei Optionen zur Auswahl. Entweder erfolgt die Berücksichtigung der Bewehrung „diskret“, indem zusätzliche Balkenelemente zur Abbildung des Stahls verwendet werden, oder „verschmiert“ durch Erhöhung der Steifigkeit der umgebenden Betonelemente. Der Verbund zwischen Stahl und Beton wird bei beiden Varianten unterschiedlich berücksichtigt. Während die „diskrete“ Bewehrung eine Verbindung beider Elemente erfordert, die meist über zusätzliche Kontaktelemente realisiert wird, wird bei der „verschmierten“ Bewehrungseingabe starrer Verbund zwischen Bewehrung und Beton angenommen. Zudem lässt DIANA für verschmierte Bewehrung lediglich Materialgesetze zu, die ein ausgeprägtes Fließverhalten aufweisen – ein Reißen der Bewehrung ist über die Abbildung einer verschmierten Bewehrung in DIANA nicht möglich. Basierend auf den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen, in denen je nach Bewehrungsgehalt ein Versagen der Mikrobewehrung festgestellt wurde, wird die Mikrobewehrung als diskrete Bewehrung mit Berücksichtigung des Reißens abgebildet.

5.3.2 Elementtypen

Um das Tragverhalten eines realen Bauteils abbilden zu können, sind neben den Materialeigenschaften auch geeignete Elementtypen zu verwenden. Diese sind u. a. abhängig von der Art und den Abmessungen der Konstruktion sowie von der Belastung und der zur Verfügung stehenden Rechenleistung.

In der vorliegenden Arbeit werden ausschließlich Berechnungen an zweidimensionalen Biegebalken vorgenommen. Zur Abbildung des UHPC kommen daher zweidimensionale „plane stress“ Elemente (mit ebenem Spannungszustand) zum Einsatz. In Voruntersuchungen wurden zur Modellierung des UHPC sowohl Elemente mit linearem als auch solche mit quadratischem Ansatz verwendet. Die Elemente mit einem Zwischenknoten lieferten dabei eine realitätsnahe Abbildung der fein verteilten Rissbildung und einen stabileren Berechnungsfortschritt. Aus diesem Grund werden im Folgenden vierseitige, isoparametrische Elemente mit quadratischem Ansatz (CQ16M) verwendet.

Die Mikrobewehrung, abgebildet als diskrete Bewehrung, wird über Balkenelemente (CL9BE) berücksichtigt. Um diese mit den Betonelementen verbinden zu können, besitzen sie ebenfalls einen Zwischenknoten.

5.3.3 Verbund

In der Regel erfolgt die Verbindung der Stahl- und Betonelemente über Kontaktelemente (engl. Interface-elements). Den Kontaktelementen werden entsprechende Verbundspannungs-Schlupf-Beziehungen zugewiesen, die meist aus zuvor durchgeführten Versuchen resultieren. Im Fall der Mikrobewehrung ergaben die Verbundversuche (Kapitel 3.3) eine starre Verbindung zwischen Stahl und Beton in den Schnittpunkten der Längs- und Querdrahte der Mikrobewehrung. Zur Modellierung wurden daher die Knoten der Stahl- und Betonelemente im Abstand der Maschenweite aneinander gekoppelt, sodass die möglichen Verschiebungen der Mikrobewehrung in beide Richtungen den Verschiebungen des Betons in den Kopplungsstellen folgen. Aus ergänzenden Untersuchungen zum Verbundverhalten zwischen den Drahtkreuzungspunkten ging ein verhältnismäßig geringer Widerstand gegen Ausziehen der glatten Drähte hervor (Kapitel 3.3). Aufgrund der geringen Maschenweite von maximal 20 mm (bzw. 22 mm Achsmaß) und den in diesem Abstand regelmäßig folgenden Kreuzungspunkten mit starrer Kopplung, wird auf die Einführung zusätzlicher Kontaktelemente über die Länge der freien Maschenweite verzichtet. Wie in Kapitel 5.3.4 beschrieben, ist die Element- und Knotenanzahl bedingt durch die Kopplungsstellen für die vorgestellten Balken ohnehin vergleichsweise hoch, sodass eine Einsparung an Elementen auch vor dem Hintergrund eines vertretbaren Rechenaufwands durchaus sinnvoll erscheint.

Zur Klärung des Einflusses auf die Ergebnisse, wurden sowohl Berechnungen mit vollständig starrer Kopplung, d.h. jeder Stahlknoten ist starr mit einem zugehörigen Betonknoten verbunden, als auch Berechnungen mit einer starren Kopplung nur an den Kreuzungspunkten, wie oben bereits beschrieben, durchgeführt. Während der Fall einer vollständig starren Kopplung die tatsächlichen Verbundeigenschaften überschätzt, werden die realen Verbundbedingungen bei einer ausschließlichen Kopplung der Kreuzungspunkte unterschätzt. Die Realität mit einem starren Verbund in den Kreuzungspunkten und einer Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung zwischen diesen, liegt zwischen den betrachteten Grenzfällen. Am Beispiel eines Vierpunkt-Biegebalkens ($l = 600$ mm, $b \times h = 150 \times 150$ mm) mit dem Mikrobewehrungstyp MB4, vertikaler

Mikrobewehrungsanordnung und 4,7 Vol.-% Stahlgehalt werden die Unterschiede in der Last-Verformungs-Kurve beider Verbundvarianten exemplarisch erläutert.

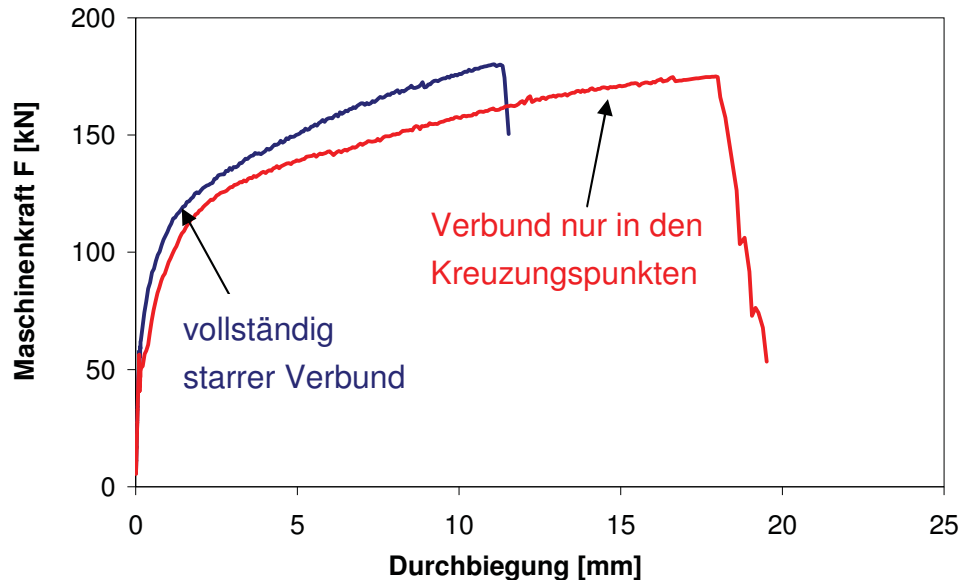


Abbildung 5.5: Einfluss unterschiedlicher Verbundmodellierungen

Während die vollständige starre Kopplung aller Knoten zu einer höheren Kraftaufnahme bereits bei geringen Verformungen führt, resultiert aus der nur in den Kreuzungspunkten starren Verbindung aufgrund der geringeren Steifigkeit eine höhere Verformungsfähigkeit. Unter Berücksichtigung der an Biegebalken durchgeführten experimentellen Untersuchungen (Kapitel 3.6.4) wird je nach Mikrobewehrungsanordnung die Verbundmodellierung angepasst. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass das steifere Verhalten für eine Ausrichtung der Mikrobewehrungsmatten vertikal durch Verwendung des "vollständig starren Verbundes" gut berücksichtigt werden kann, während eine "Kopplung nur in den Kreuzungspunkten" für eine Ausrichtung der Mikrobewehrungsmatten horizontal der vergleichsweise geringeren Steifigkeit Rechnung trägt.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass insbesondere vor dem Hintergrund eines deutlich erhöhten Rechen- und Modellierungsaufwands, eine Kopplung in den Kreuzungspunkten bzw. über die gesamte Elementlänge zu ausreichend genauen Ergebnissen führt und der Einsatz zusätzlicher Kontaktelemente nicht notwendig ist.

5.3.4 Finite Elemente Netz

Bedingt durch die im Abstand der Maschenweite erforderlichen Knoten zur Verbindung von Stahl- und Betonelementen, ist die Minimalanzahl an Betonknoten abhängig von der Maschenweite. Um Einflüsse aus ungünstigen Elementabmessungen auszuschließen, besitzen die Betonelemente ein Kantenlängenverhältnis von $b/h \sim 1,0$.

Abbildung 5.6 zeigt das Netz eines Vierpunkt-Biegebalkens ($l = 600$ mm, $b \times h = 150 \times 150$ mm) mit dem Mikrobewehrungstyp MB4 (senkrecht zur Belastung eingebaut) und 2,4 Vol.-% Stahlgehalt sowie die zugehörigen Kopplungen, die als Kreise dargestellt sind. Um Singularitäten im Lasteinleitungs-/Auflagerbereich zu vermeiden, werden zusätzlich steife Auflagerplatten zur Lastverteilung modelliert.

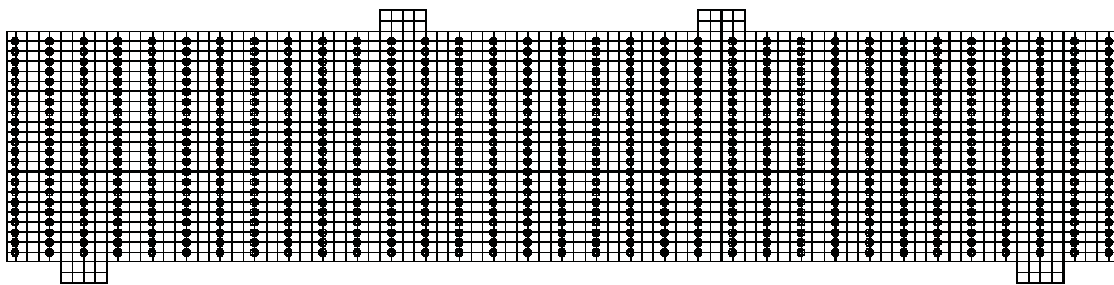


Abbildung 5.6: Beispiel eines Finite-Elemente-Netzes

Auf eine Ausnutzung der Symmetrie in der Modellierung wird verzichtet, da diese in einigen Fällen dazu führt, dass die Biegerissbildung im Bereich der Symmetrieebene in großem Maß beeinträchtigt wird.

5.3.5 Iterative Berechnung

Jede nicht-lineare Berechnung wird in einzelnen Laststufen durchgeführt. Ziel jedes Schrittes ist die Herstellung des Gleichgewichtszustands nach einer festgelegten Anzahl an Iterationen. Dabei ist die Toleranzgrenze für evtl. Restkräfte vorzugeben und ein oder mehrere Konvergenzkriterien zu wählen. In den vorliegenden Analysen ist die maximale Anzahl an Iterationen auf 35 begrenzt und eine Toleranzgrenze (für das Energiekriterium) von 10^{-4} gewählt.

Die iterative Berechnung wird mit der Newton-Raphson Methode durchgeführt, da das Nachbruchverhalten mit Hilfe vorgegebener Verformungen (= weggesteuerte Belastung) gut abgebildet werden kann. Dabei wird die tangentialsteifigkeitsmatrix in jedem Iterationsschritt neu aufgestellt, was zunächst zu einem höheren Rechenaufwand führt, der sich jedoch aufgrund des günstigeren Konvergenzverhaltens insbesondere bei nichtlinearen Berechnungen relativiert, da hierdurch i. d. R. eine geringere Anzahl an Iterationsschritten erforderlich ist.

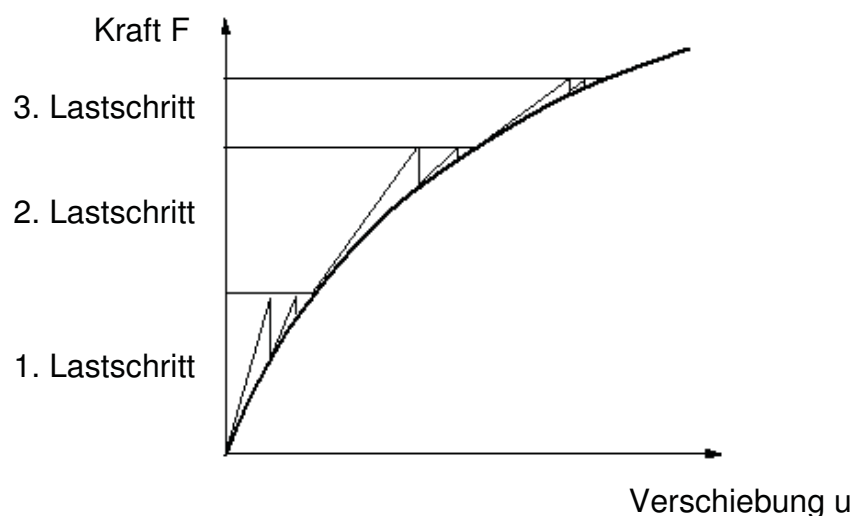


Abbildung 5.7: Prinzip der Standard-Newton-Raphson Methode

5.4 Evaluation des numerischen Modells

5.4.1 Allgemeines

Zur Überprüfung der angesetzten Material- und Verbundmodelle werden einige der zuvor experimentell untersuchten Probekörpergeometrien modelliert, berechnet und deren Ergebnisse denjenigen der Versuchskörper gegenübergestellt.

5.4.2 Druck

Um die Zuverlässigkeit des Materialmodells und die Stabilität der Berechnung zu überprüfen, wurden Voruntersuchungen an dreidimensionalen Viertelkreiszyklindern aus unbewehrtem UHPC (Abbildung 5.8 a), b)) durchgeführt. Dabei wurde allen Elementen das Materialverhalten nach Thorenfeldt (Abbildung 5.1) mit einer Druckfestigkeit von 150 N/mm^2 und einem E-Modul von 49.000 N/mm^2 zugewiesen. Die Abmessungen des Zylinders entsprechen denen der Versuchskörper ($H = 300 \text{ mm}$, $D = 150 \text{ mm}$).

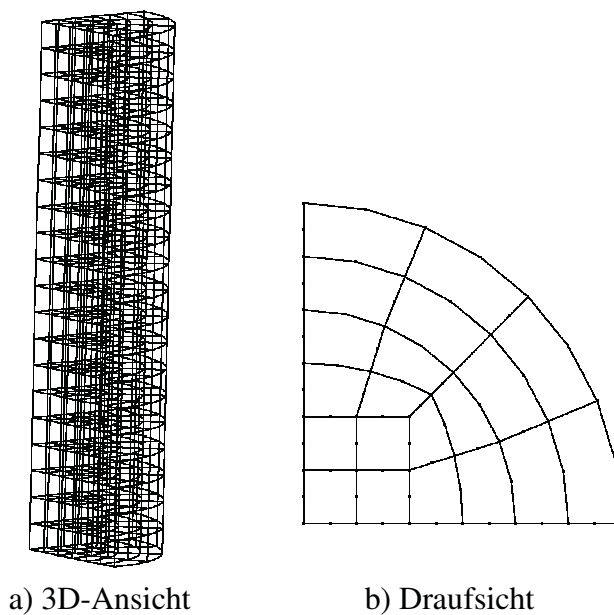


Abbildung 5.8: Finite-Elemente-Modell des Druckversuchs

Die aus der verformungsgesteuerten Berechnung resultierende Spannungs-Dehnungs-Linie ist in Abbildung 5.9 dargestellt. Die Dehnung wird über das Verhältnis der Basislänge ($300 \text{ mm} = \text{Höhe des Zylinders}$) zur Längenänderung (= Vertikalverschiebung der Lasteinleitungsknoten) errechnet, die Spannung entsprechend über die Beziehung Kraft/Fläche. Vergleichend sind die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen aus den experimentellen Untersuchungen abgebildet. Der Vergleich zeigt, dass das Materialverhalten unter der Druckbeanspruchung zuverlässig abgebildet werden kann. Gleichung (4.1) berücksichtigt die für UHPC typische hohe Elastizitätsgrenze und verhältnismäßig hohe Dehnung unter Höchstkraft. Ebenfalls werden der steile Lastabfall sowie die geringe Bruchdehnung durch diese Funktion realitätsnah abgebildet.

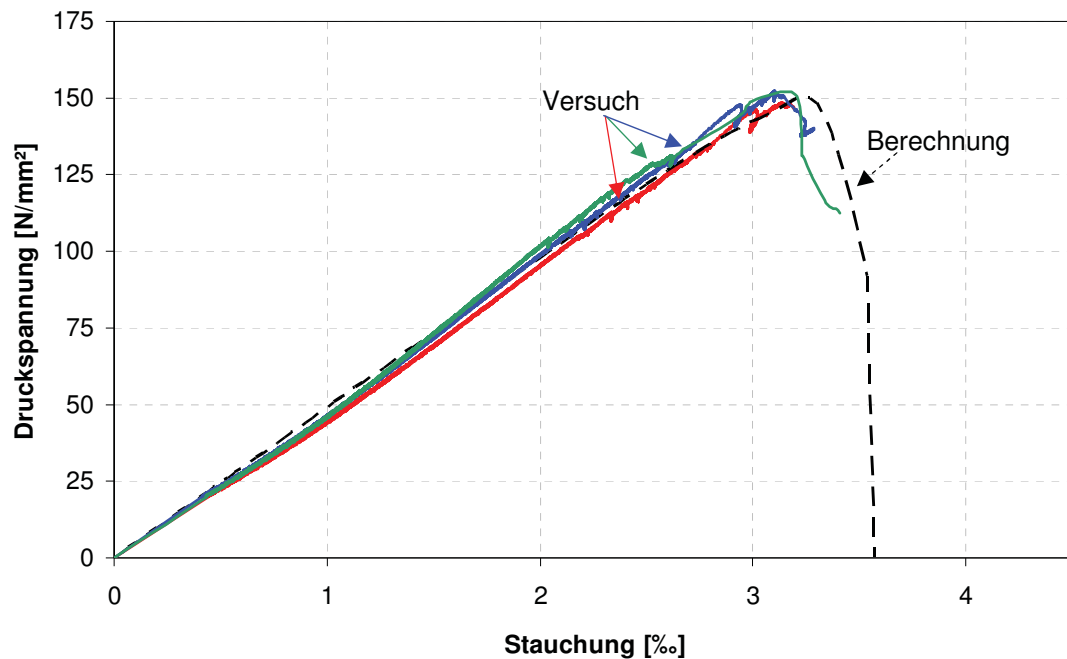


Abbildung 5.9: Gegenüberstellung der Spannungs-Dehnungs-Linien aus Versuch und Berechnung (unbewehrter UHPC)

5.4.3 Biegung

Anhand eines Vergleichs der Last-Verformungs-Kurven aus Berechnung und Versuch (Vierpunkt-Biegebalken aus Kapitel 3.6.4) wird die Anwendbarkeit der in Kapitel 5.2 und Kapitel 5.3 beschriebenen Modelle überprüft und bewertet. Neben der Maximallast und der Verformungsfähigkeit werden ebenfalls die Rissbilder und Versagenszustände aus Versuch und Berechnung miteinander verglichen.

a) Vergleich der Maximalkräfte

In Abbildung 5.10 und Abbildung 5.11 sind die Maximalkräfte aus Berechnung und Versuch vergleichend für geringe und hohe Stahlgehalte gegenübergestellt, zudem ist die gemäß Kapitel 4.4.3 berechnete Maximalkraft aus der Querschnittsbetrachtung angegeben.

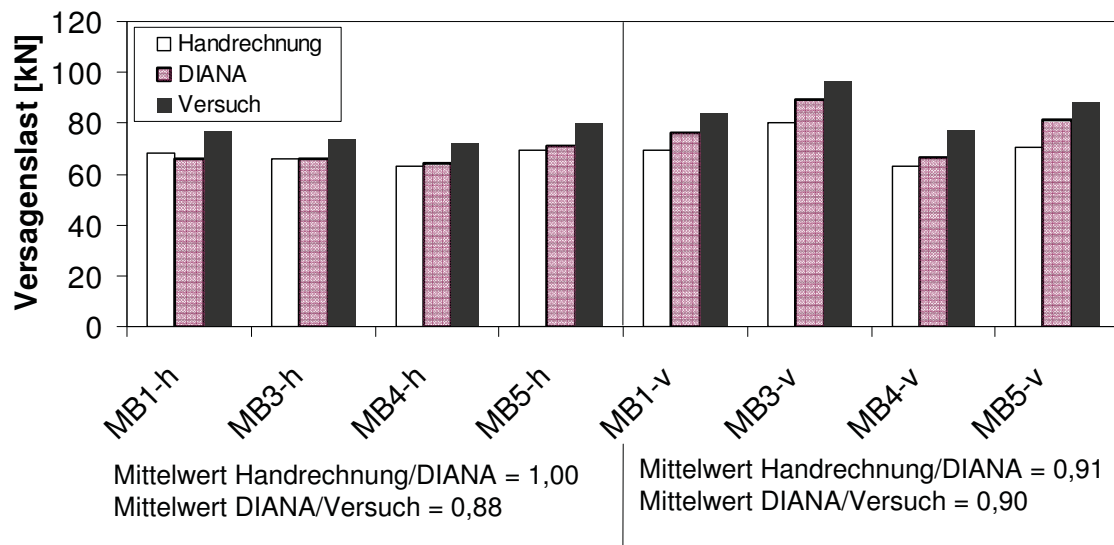


Abbildung 5.10: Maximalkräfte aus Versuch und Berechnung (geringer Mikrobewehrungsgehalt)

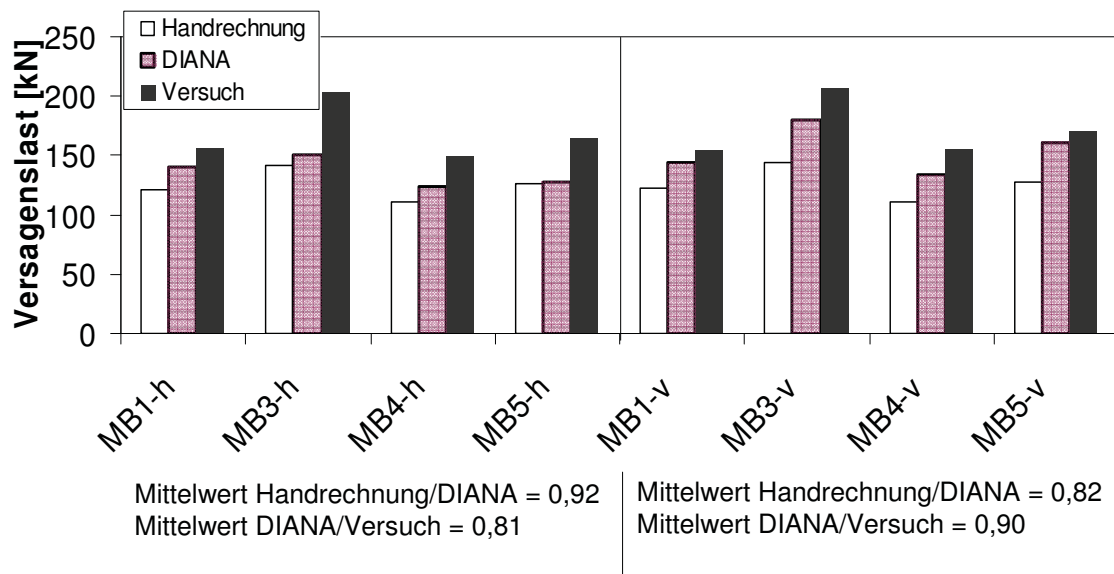


Abbildung 5.11: Maximalkräfte aus Versuch und Berechnung (hoher Mikrobewehrungsgehalt)

Für geringe Stahlgehalte (um 2,5 Vol.-%) und eine horizontale Mikrobewehrungsausrichtung sind die Versagenslasten aus Handrechnung und FE-Berechnung nahezu identisch. Bei einer Ausrichtung der Mikrobewehrungsmatten in vertikaler Richtung liegen

die Ergebnisse aus der FE-Berechnung 10 % über denen der Handrechnung. Der Grund hierfür liegt in der reinen Querschnittsbetrachtung bei der Handrechnung. Eine positive Wirkung der Querdärhte wird in diesem vereinfachten Modellansatz vernachlässigt. In der FE-Berechnung hingegen kann dieser positive Einfluss durch die Kopplung der Mikrobewehrungsdrähte untereinander erfasst werden.

Bei hohen Stahlgehalten (um 5,0 Vol.-%) und einer horizontalen Mikrobewehrungsausrichtung liegen die Versagenslasten aus der FE-Berechnung 8 % über denen der Handrechnung. Das Versagen für diese Balken ist zum einen durch ein Ausknicken der Drähte in der Druckzone bestimmt und zum anderen durch eine verstärkte Querkrafttrissbildung bzw. Plastifizierung des querkraftbeanspruchten Bereiches. Dies sind beides Effekte, die in der Querschnittsbetrachtung nicht berücksichtigt werden.

Ein Vergleich der Ergebnisse der FE-Berechnung mit den Versuchsergebnissen der Balken mit einer starken Schädigung im querkraftbeanspruchten Bereich zeigt, dass die Versagenslasten der FE-Berechnungen nahezu 20 % unterhalb den Versagenslasten der Versuchsbalken liegen. Aufgrund großer Knotenverformungen im FE-Modell (Abbildung 5.12, rechts) wird die Berechnung nach der Querkrafttrissbildung abgebrochen, während für die experimentell untersuchten Balken unter zunehmender Verformung eine Steigerung der Belastung erfolgt. Hoch bewehrte Balken mit vertikaler Ausrichtung der Mikrobewehrung weisen diese Plastifizierung im querkraftbeanspruchten Bereich nicht auf. In der Folge beträgt die Abweichung der Maximallasten hier nur 10 %.

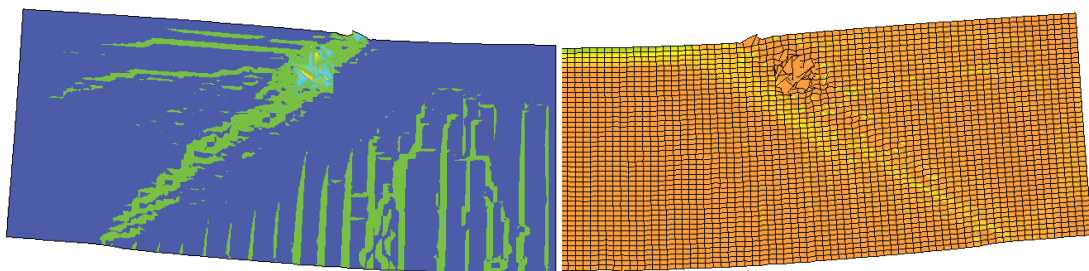


Abbildung 5.12: Hauptdehnungen ε_{xx} (links) und Hauptspannungen σ_{xx} (rechts) des UHPC am FE-Balken (MB3-6,1-h)

Während in der reinen Querschnittsbetrachtung eine Verdoppelung des Stahlgehaltes nur zu einem um den Faktor 1,78 erhöhten Tragwiderstand führt und die Druckzonen-

tragfähigkeit den limitierenden Faktor darstellt, ergibt sich sowohl im Versuch als auch in der FE-Berechnung eine Verdoppelung des Tragwiderstandes. Auch nach Schädigungen der Druckzone ist eine weitere Lastzunahme möglich. Durch eine zunehmende Krümmung kommt es zu einer Verschiebung der Druckzone unter weiterer Beanspruchung der einzelnen, vom unteren Querschnittsrand weiter entfernten Längsdrähte (Druckzone verschiebt sich nach unten).

Generell liegen die berechneten Tragfähigkeiten unterhalb derer der experimentellen Untersuchungen, sodass die reale Tragfähigkeit zu keinem Zeitpunkt überschätzt wird. Dass die berechneten Maximallasten (ca. 10 %) unterhalb der tatsächlich erreichten Lasten liegen und mit steigendem Stahlgehalt und einer horizontalen Mikrobewehrungsausrichtung voneinander abweichen, liegt in zu großen Knotenverschiebungen bei auftretenden Schädigungsmechanismen des Modells begründet, sodass bedingt durch den Abbruch der Berechnung keine höheren Lasten aufgenommen werden können. Die Maximallasten sind daher nur bedingt miteinander vergleichbar. Bis zum Abbruch der Berechnungen zeigen die Kraft-Verformungs-Kurven aus FE-Berechnung und Versuch gute Übereinstimmungen. Zudem sei darauf hingewiesen, dass derart hohe Verformungen, die durch das vorliegende Modell nicht mehr erfasst werden können, allein aus Gründen der Gebrauchstauglichkeit, von untergeordnetem Interesse sind.

b) Vergleich der Verformungsfähigkeit

In Anhang B4 sind alle Last-Verformungs-Kurven der 48 Biegebalken jenen der berechneten Last-Verformungs-Kurven gegenübergestellt. Abbildung 5.13 und Abbildung 5.14 zeigen exemplarisch die Last-Verformungs-Kurven aus Versuch und Berechnung für die beiden verschiedenen Stahlgehalte 2,6 Vol.-% und 5,1 Vol.-% für den Mikrobewehrungstyp MB1 mit horizontaler Ausrichtung.

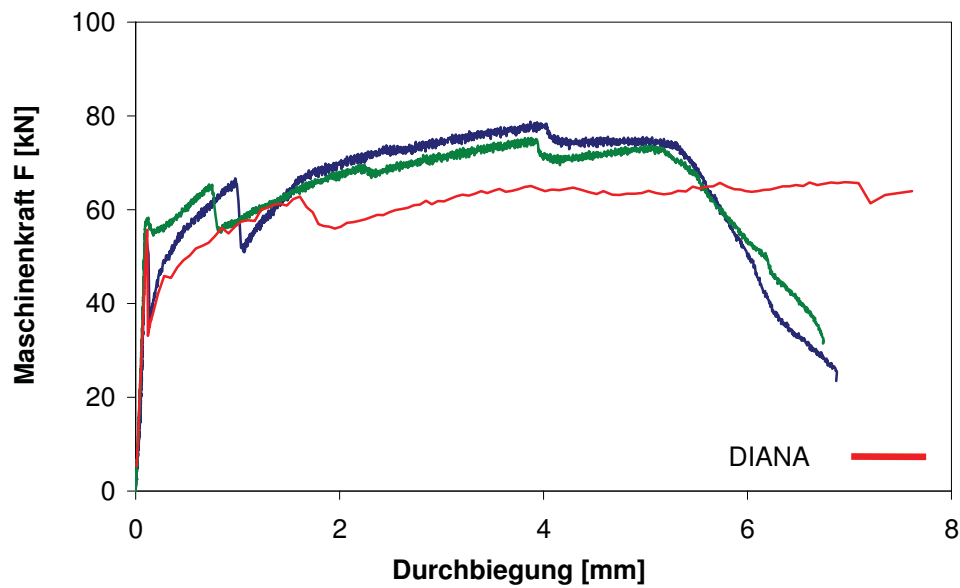


Abbildung 5.13: Vergleich der Kraft-Verformungs-Linien aus Berechnung und Versuch (MB1-2,6-2-h und 3-h)

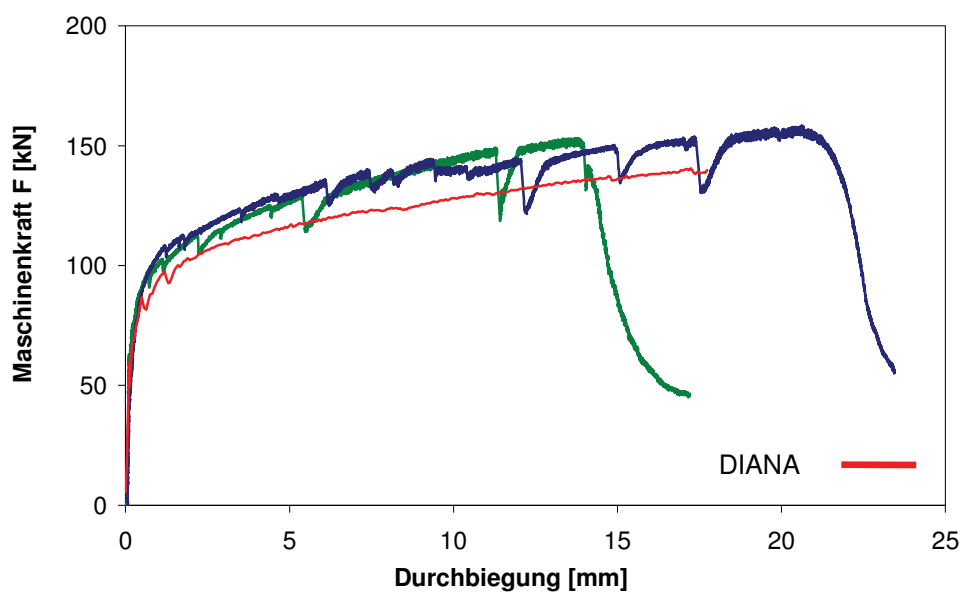


Abbildung 5.14: Vergleich der Kraft-Verformungs-Linien aus Berechnung und Versuch (MB1-5,1-51-h und 52-h)

Der Vergleich zeigt, dass das Trag- und Verformungsverhalten der Balken mit den zuvor definierten Modellen grundsätzlich gut beschrieben werden kann. Die Erstrissbil-

dung und das lange Plateau werden in der Berechnung unter Berücksichtigung der einzelnen Materialgesetze in Kombination mit der Verbundcharakteristik gut abgebildet. Die Maximalkräfte aus Berechnung und Versuch weichen um 10 % bis 15 % voneinander ab. Insbesondere in der Phase nach der Erstrissbildung ist das Verhalten der "berechneten" Balken weicher als das tatsächliche Verformungsverhalten der Balken im Versuch. Diese geringere Steifigkeit im Berechnungsmodell liegt in den nachfolgend erläuterten Ursachen begründet. Ein Grund ist die Genauigkeit der Lage der Mikrobewehrungsmatten. Ein Unterschied im Randabstand zwischen Berechnung und Versuch hat einen maßgebenden Einfluss bezüglich der Steifigkeit in der Rissbildungsphase. Ein weiterer Grund liegt in der geringen Bruchenergie, die im Modell für den UHPC auf Zug angesetzt wurde. Diese Sprödigkeit in Kombination mit dem konservativen Verbundgesetz, welches eine starre Kopplung nur in den Kreuzungspunkten der Längs- und Querdrähte für die horizontale Mikrobewehrungsausrichtung berücksichtigt, führt im Modell zu einem höheren Kraftabfall nach dem Erstriss als in der Realität. Eine in Voruntersuchungen durchgeführte Variation des Entfestigungsgesetzes lieferte bei Ansatz einer höheren Bruchenergie (80 N/m) und eines exponentiellen Abfalls der Mitwirkung des UHPC auf Zug (Gesetz nach Hordijk) zwar ein steiferes Verhalten im Bereich der Erstrissbildung, führte jedoch auch zu einer, zum Teil erheblichen Überschätzung der Erstrisskraft. Aus diesem Grund wurde von einer Änderung des auf Basis von Einzelversuchen und der Literatur angesetzten Materialmodells abgesehen.

Der Einfluss der Ausrichtung der Mikrobewehrung wird durch das Modell gut wiedergegeben, denn das Tragverhalten im Modell wird durch die Anordnung der Mikrobewehrungsmatten vertikal in nahezu gleicher Art beeinflusst, wie in den experimentellen Untersuchungen. Die Vertikaldrähte führen, wie auch im Versuch dazu, dass die Steifigkeit der Balken erhöht wird. Ein gutes Beispiel hierfür liefern die Balken der Serie MB3-6,1. Während eine Anordnung der Mikrobewehrungsmatten horizontal mit einer ausgeprägten Querkraftrissbildung mit anschließender Plastifizierung des querkraftbeanspruchten Bereiches einhergeht, versagen Balken mit einer Anordnung der Bewehrung vertikal durch Risslokalisierung im biegebeanspruchten Bereich (Abbildung 5.15).

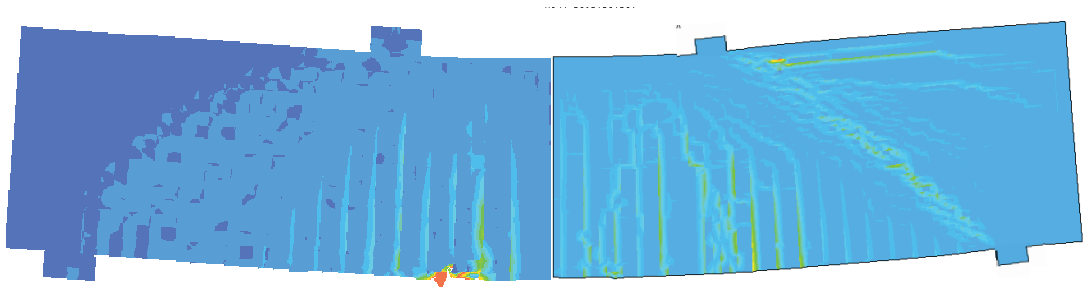


Abbildung 5.15: Hauptdehnungen ε_{xx} des UHPC am FE-Balken MB3-6,1-v (links) und MB3-6,1-h (rechts)

Ein Vergleich aller berechneten und experimentell ermittelten Last-Verformungs-Kurven in Anhang B4 zeigt, dass die Plastifizierung zwar gut abgebildet werden kann, die Versuchskörper dennoch ein gutmütigeres Verhalten aufweisen, als es mit dem vorgestellten Modell abgebildet werden kann. Eine Möglichkeit der realitätsnäheren Abbildung stellt die Änderung der Toleranzgrenze dar. Für eine höhere Toleranzgrenze werden größere Verschiebungsdifferenzen der einzelnen Knoten zugelassen und damit das plastische Verhalten besser berücksichtigt.

c) Vergleich der Rissbilder

Eine Gegenüberstellung der Hauptspannungen und -dehnungen im Modell unter Versagenslast (Abbildung 5.17 und Abbildung 5.18) mit dem Rissbild des Balkens MB1-5,1-52-h nach Versuchsende (Abbildung 5.16) zeigt ebenfalls eine gute Übereinstimmung. Im Modell entspricht der Abstand der Risse genau dem Abstand der Querdärhte (= Maschenweite). Lediglich in zwei Bereichen des Versuchsbalkens ist dieser Abstand größer und entspricht der doppelten bzw. dreifachen Maschenweite. Die Ausbreitung der Risse über die Balkenlänge ist in Berechnung und Versuch vergleichbar. Der gerissene Bereich entspricht in beiden Fällen jeweils 2/3 der Stützweite. Wie im Versuch wird die Druckzone im Modell stark eingeschnürt und es kommt zu einem Reißen der Längsdärhte.

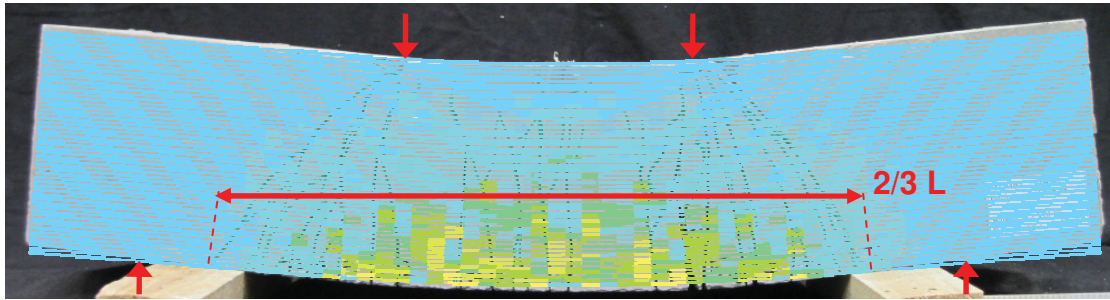


Abbildung 5.16: Balken nach Versuchsende (MB1-5,1-52-h), Hauptdehnung der Mikrobewehrungsmatten ϵ_{xx} (= gerissener Bereich) aus FE-Balken (MB1-5,1-h) eingeblendet

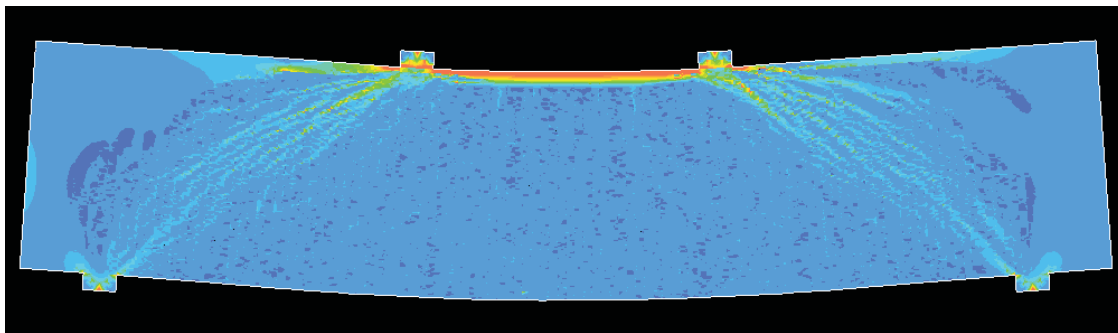


Abbildung 5.17: Hauptspannungen σ_{xx} des UHPC am FE-Balken (MB1-5,1-h)

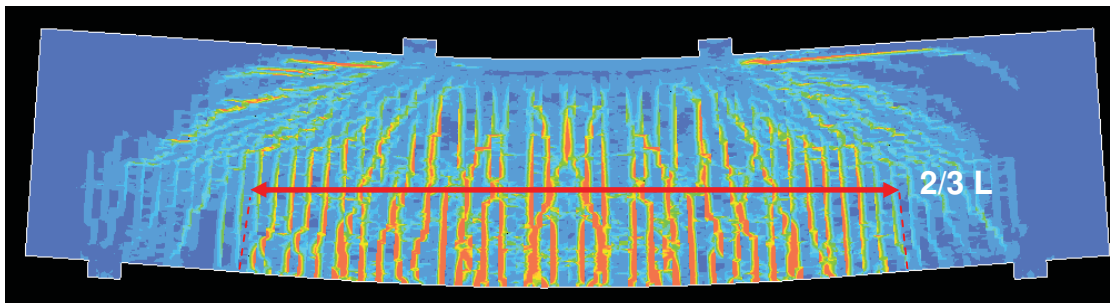


Abbildung 5.18: Hauptdehnungen ϵ_{xx} des UHPC am FE-Balken (MB1-5,1-h)

Auch das Querkraftversagen der Balkenserie MB3-6,1-h wird durch das vorliegende Modell gut abgebildet. In Abbildung 5.19 ist den Hauptdehnungen des berechneten Balkens der Versuchsbalken MB3-6,1-56-h mit Rissbildung bei Versagen gegenübergestellt. Sowohl die regelmäßige Rissbildung im Abstand der Querdrähte, als auch die ausgeprägte Plastifizierung werden realitätsnah abgebildet. Auch die Schädigung der Druckzone in Form von Abplatzungen oder Ausknicken der obersten Drähte bei den

hoch bewehrten Probekörpern wird durch das Modell erfasst (Abbildung 5.20 und Abbildung 5.21).

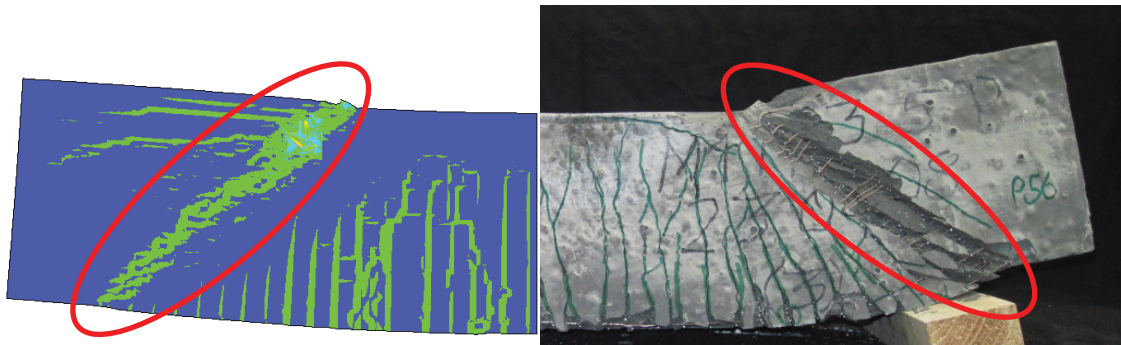


Abbildung 5.19: Hauptdehnungen ϵ_{xx} am FE-Balken (links) und Balken nach Biegeversuch, MB3-6,1-56-h (rechts)

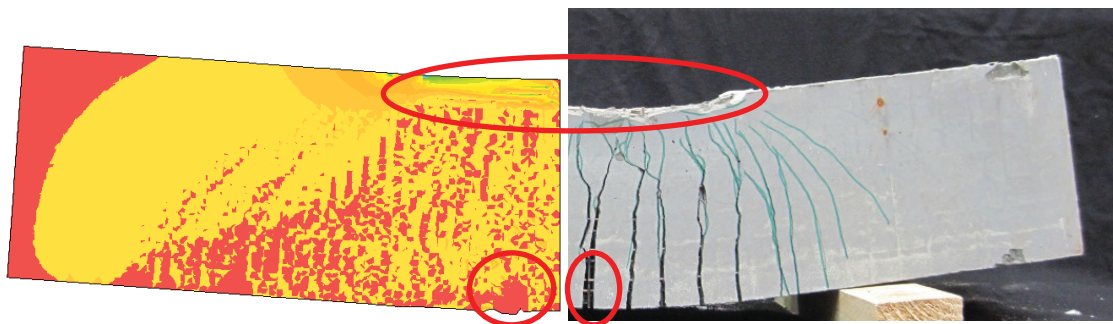


Abbildung 5.20: Hauptspannungen σ_{xx} am FE-Balken (links) und am Balken nach Biegeversuch, MB5-5,4-60-v (rechts)

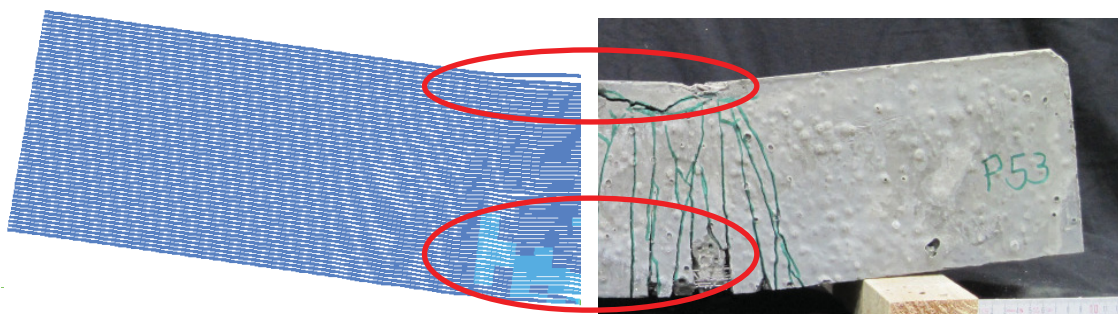


Abbildung 5.21: Verformung der Mikrobewehrung am FE-Balken (links) und am Balken nach Biegeversuch, MB1-5,1-53-h (rechts)

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Verbundmodellierung der Mikrobewehrungsdrähte, die senkrecht zur Haupttragrichtung angeordnet sind, dazu führt, dass unabhängig von der Mikrobewehrungsausrichtung, wie in den praktischen Versuchen, ein regelmäßiges Rissbild in Abhängigkeit der Querdrähte entsteht. Besonders gut ist dieser Umstand an den Versuchskörpern mit einem hohen Mikrobewehrungsgehalt zu erkennen, da hier die Rissbildung vor dem Versagen sehr deutlich ausgeprägt ist (Abbildung 5.16, Abbildung 5.22 und Abbildung 5.23).

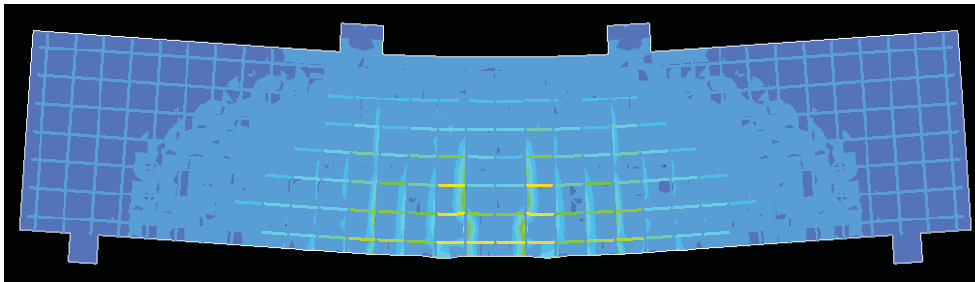


Abbildung 5.22: Hauptdehnungen ϵ_{xx} am FE-Balken in UHPC sowie in der Mikrobewehrung, MB4-4,7-v

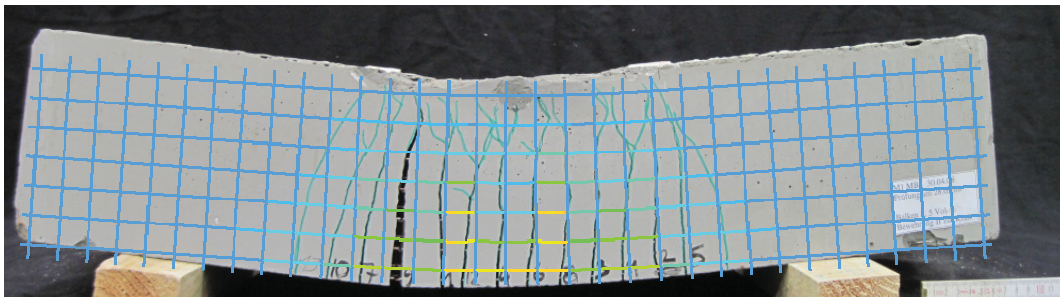


Abbildung 5.23: Rissbild des Balkens MB4-4,7-58-v sowie Hauptdehnungen ϵ_{xx} am FE-Balken in der Mikrobewehrung

Aufgrund der zweidimensionalen Modellierung und der Angabe eines äquivalenten Stahldurchmessers in Balkentiefe, findet der Einfluss des Drahtdurchmessers in der Berechnung keine Berücksichtigung. Wie jedoch in Kapitel 3.6.4 gezeigt wurde, ist dieser ohnehin von untergeordneter Bedeutung aufgrund des hohen Einflusses der Maschenweite.

Kapitel 6

Entwicklung eines Bemessungsansatzes

6.1 Allgemeines

Für die Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit gilt folgende Bedingung:

Bemessungswerte der Einwirkung $E_d \leq$ Bauteilwiderstand R_d

wobei der Bemessungswert der Einwirkungen durch Ansatz der ungünstigsten Einwirkungskombination beaufschlagt mit Teilsicherheitsbeiwerten (γ) gemäß DIN EN 1990 [DIN1990] bestimmt wird.

Die Ermittlung des Bauteilwiderstandes R_d , Inhalt des vorliegenden Kapitels, erfolgt über eine Kombination aus den folgenden Komponenten:

- Geometrie des Bauteils,
- Spannungs-Dehnungs-Beziehung des UHPC einschließlich zugehöriger Teilsicherheitsbeiwerte,
- Spannungs-Dehnungsbeziehung der Mikrobewehrung einschließlich zugehöriger Teilsicherheitsbeiwerte.

6.2 Voraussetzungen

Der Einfluss einer Mikrobewehrung auf das Schwindverhalten des UHPC ist nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit, ebenso wie Langzeitbeanspruchungen und dynamische Einwirkungen. In dem vorliegenden Ansatz werden lediglich zeitunabhängige Ef-

fekte berücksichtigt. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass Untersuchungen zum zeitabhängigen Materialverhalten ausstehen.

Des Weiteren werden nur Einflüsse aus Verformungen gemäß Theorie I. Ordnung herangezogen, da vorausgesetzt wird, dass die Gleichgewichtsbedingungen am unverformten System formuliert werden können.

6.2.1 Spannungs-Dehnungs-Beziehung des UHPC - Druck

Die zur Bemessung von mikrobewehrtem UHPC erforderliche Spannungs-Dehnungs-Beziehung im Druckbereich wird auf Grundlage der experimentellen Untersuchungen (Kapitel 3.4) definiert.

Gemäß DIN EN 1992-1-1 [DIN1992] mit Nationalem Anhang Deutschland [DIN1992NA] errechnet sich der Bemessungswert der Druckfestigkeit für hochfeste Betone ohne besondere Qualitätskontrollen nach Gleichung (6.1):

$$f_{cd} = 0,85 \cdot \frac{f_{ck}}{1,5 \cdot \gamma_c'} \quad (6.1)$$

mit

$$\gamma_c' = \frac{1}{(1,1 - \frac{f_{ck}}{500})} \quad (6.2)$$

Eine Anwendung der Gleichung (6.1) auf den vorliegenden UHPC mit $f_{cm} = 151 \text{ N/mm}^2$ führt zu einem Bemessungswert der Druckfestigkeit von $f_{cd} = 66 \text{ N/mm}^2$. Ursache für die Reduktion des Bemessungswertes, auf lediglich ca. 44 % der mittleren Druckfestigkeit, ist der zusätzliche Sicherheitsbeiwert γ_c' , der zur Berücksichtigung der Sprödigkeit, höherer Streuungen sowie der Sensibilität des Herstellungsprozesses hochfester Betone eingeführt wurde. Auf der Basis umfassender Untersuchungen und des Ergebnisses, dass die Streuung der Druckfestigkeit mit steigender Druckfestigkeit sinkt, wird in [TuSc03] vorgeschlagen auf den zusätzlichen Sicherheitsbeiwert zu verzichten. Sämtliche derzeit gültige nationale und internationale Richtlinien zur Bemessung von UHPC enthalten diese zusätzliche Sicherheit nicht.

Daneben wird davon ausgegangen, dass bei der Herstellung von UHPC erhöhte Qualitätskontrollen durchgeführt werden und es wird daher der Ansatz von [FeLeu11] aufge-

griffen, den Teilsicherheitsbeiwert γ_c zu 1,3 anzusetzen. Zur Bemessung von mikrobewehrtem UHPC mit $f_{cm} \geq 150 \text{ N/mm}^2$ wird daher die Gleichung (6.3) vorgeschlagen:

$$f_{cd} = 0,85 \cdot \frac{f_{ck}}{1,3} \quad (6.3)$$

Für UHPC-Mischungen ohne Mikrobewehrung wird jedoch ein zusätzlicher Sicherheitsfaktor zur Berücksichtigung der Sprödigkeit empfohlen.

Unter Ansatz der Kriechzahl von $\phi = 0,8$, wie in [Schm08] für nicht wärmebehandelten UHPC vorgeschlagen, resultiert nach Gleichung (6.4) ein Langzeit-E-Modul von

$$E_{\infty} = \frac{E_{cm}}{1 + 0,8} \quad (6.4)$$

Für die Bemessung wird analog zu Normalbeton ein Belastungsalter von drei Tagen angenommen. Die zugehörige Kriechzahl wird in Anlehnung an [Schm08] zu $\phi = 0,3$ geschätzt. Damit beträgt der Bemessungswert des E-Moduls

$$E_{cd} = \frac{E_{cm}}{1 + 0,3} = \frac{49.000}{1 + 0,3} = 37.692 \text{ N/mm}^2 \quad (6.5)$$

Aus den oben genannten Überlegungen zu den Bemessungswerten resultiert die in Abbildung 6.1 rot dargestellte Spannungs-Dehnungs-Beziehung im Druckbereich für die Querschnittsbemessung. In blau ist die mittlere Materialkennwertkurve aus den experimentellen Untersuchungen angegeben. Aufgrund großer Streuungen wurde auf eine Darstellung des Nachbruchbereichs verzichtet.

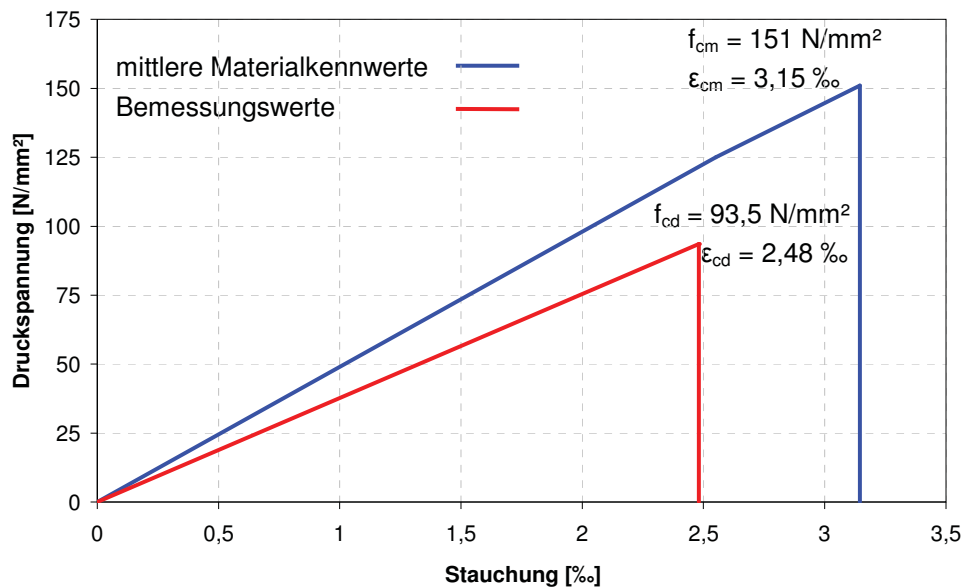


Abbildung 6.1: Spannungs-Dehnungs-Linie unbewehrter UHPC-Zylinder ($\varnothing=150$ mm, $h=300$ mm)

Die für die Bemessung relevante Beziehung zwischen Spannung und Dehnung (roter Kurvenverlauf) wird aufgrund des in den Versuchen (Kapitel 3.4) gezeigten ausgeprägten linearen Verhaltens vor dem Bruch vereinfacht als Gerade dargestellt. Zudem wird die Entfestigung für die Bemessung vernachlässigt und die zur maximalen Spannung zugehörige Dehnung gleich der Bruchdehnung gesetzt.

Der abfallende Ast der Spannungs-Dehnungs-Linie lässt sich nur bei verformungsgesteuerter Versuchsdurchführung erfassen und besitzt eine starke Abhängigkeit von der Steifigkeit der Versuchseinrichtung sowie der Belastungsgeschwindigkeit. Das Nachbruchverhalten stellt damit keine zuverlässige Materialeigenschaft des UHPC dar. Als Folge bleibt der abfallende Ast in der Definition der Materialkurve unberücksichtigt. Die Mikrobewehrung führt zwar zu einem "Zusammenhalten" der Probekörper, ein duktileres Materialverhalten kann ähnlich wie bei faserbewehrtem UHPC [Wef10] ebenfalls nicht erreicht werden (Kapitel 3.4.4).

6.2.2 Spannungs-Dehnungs-Beziehung des mikrobewehrten UHPC - Zug

In Analogie zum Stahlbetonbau bleibt die Zugfestigkeit des UHPC für Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit unberücksichtigt. Für Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit kann unter Ansatz der Gleichungen aus Kapitel 4.3.4 eine Mindestzugspannung berücksichtigt werden. Der charakteristische Wert der Mindestzugspannung des mikrobewehrten UHPC $\sigma_{\text{comp,min d}}$ ist nach Gleichung (4.14) zu bestimmen. Dabei ist auf der sicheren Seite liegend eine Bruchenergie von 50 N/m für den Feinkorn-UHPC angesetzt.

6.2.3 Spannungs-Dehnungs-Beziehung der Mikrobewehrung

Die verwendete Mikrobewehrung weist ein elastisch-plastisches Materialverhalten auf. Zur Bemessung wird die in Abbildung 6.2 angegebene Spannungs-Dehnungs-Linie vorgeschlagen. Die Bemessungswerte der Streckgrenze und der Zugfestigkeit ergeben sich durch Berücksichtigung eines Teilsicherheitsbeiwertes für den Stahl gemäß DIN EN 1992-1-1 [DIN1992] von $\gamma_{\text{MB}} = 1,15$. Der Bemessungswert des E-Moduls ist 200.000 N/mm^2 . Die Grenzdehnung der Mikrobewehrung $\varepsilon_{\text{MB,u}}$ wird zu 88 ‰ angegeben. Hiermit wird die hohe Duktilität der Mikrobewehrung berücksichtigt.

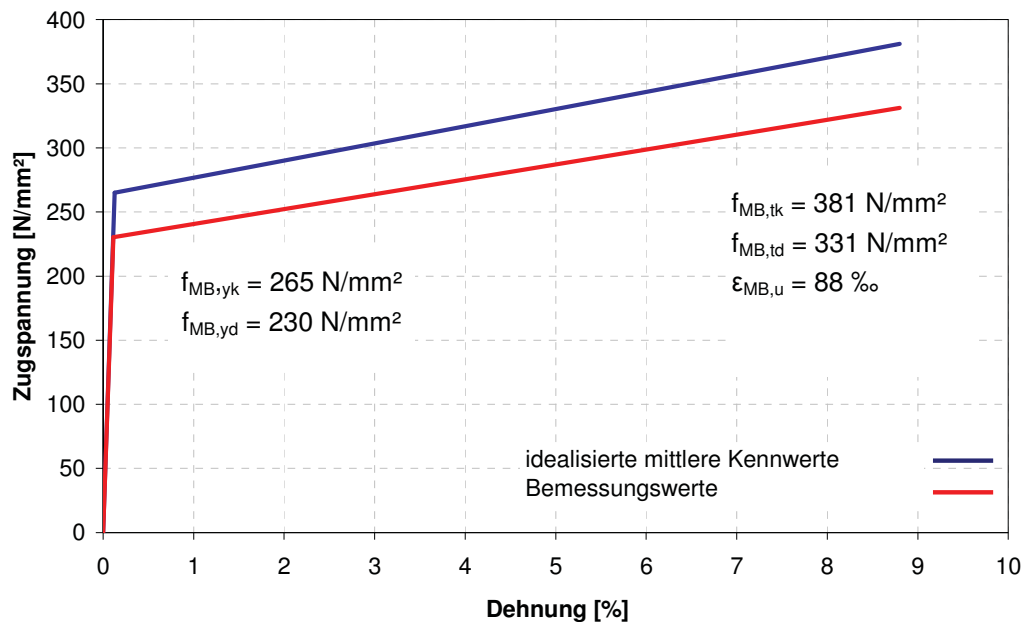


Abbildung 6.2: Spannungs-Dehnungs-Linie für die verwendete Mikrobewehrung

6.3 Bemessungshilfsmittel für den Grenzzustand der Tragfähigkeit - Bemessung für reine Biegung

6.3.1 Bemessungstafel

Gemäß der analytischen Beschreibung der Biegetragfähigkeit in Kapitel 4.4 wird eine Bemessungstafel für Rechteckquerschnitte zur Ermittlung des erforderlichen Mikrobewehrungsgehaltes in Abhängigkeit des einwirkenden Momentes, der Geometrie des Bauteils und der Güte der Mikrobewehrung sowie der des UHPC entwickelt.

Die in Kapitel 6.2 erläuterten Materialgesetze bilden die Basis der Bemessungstafel. Als Folge der durchgeführten Untersuchungen sind zwei weitere höherwertige Stähle mit in die Bemessungstafel aufgenommen (siehe auch Anhang C1). Unter Verwendung von Bauteilgeometrien von 35 mm bis 600 mm Höhe (h) und Breite (b) mit variierenden Verhältnissen von b/h und Mikrobewehrungsgehalten von 0,5 bis 8,5 Vol.-% in vertikaler und horizontaler Ausrichtung sowie den drei verschiedenen Stahlgüten wurden knapp 4500 Berechnungen durchgeführt. Der Drahtdurchmesser der Mikrobewehrung

wurde zwischen 0,5 und 2,5 mm variiert und die Maschenweite, stets mit quadratischen Abmessungen, von 5 bis 25 mm verändert. Mit den variierenden Parametern wurden die aufnehmbaren Momente M_{Rd} , die Dehnungen in der äußersten Lage der Mikrobewehrung $\varepsilon_{MB,Rand}$ sowie die bezogenen Druckzonenhöhen x/h der verschiedenen Querschnitte bestimmt. Mit Einführung der Hilfsgröße m [N/mm^2], wobei

$$m = \frac{M}{b \cdot h^2}, \quad (6.6)$$

und den zuvor durchgeführten Berechnungen lassen sich die Abhängigkeiten des Mikrobewehrungsgehaltes V_{MB} , der Dehnung $\varepsilon_{MB,Rand}$ sowie der bezogenen Druckzonenhöhe x/h von dieser Hilfsgröße m bestimmen. In Abbildung 6.3, Abbildung 6.4 und Abbildung 6.5 sind die genannten Beziehungen exemplarisch für den Stahltyp 3 kombiniert für eine vertikale und horizontale Ausrichtung der Mikrobewehrung dargestellt. Zusätzlich zu den berechneten Wertepaaren sind Näherungsfunktionen sowie die zugehörigen Bestimmtheitsmaße dieser Näherungsfunktionen angegeben.

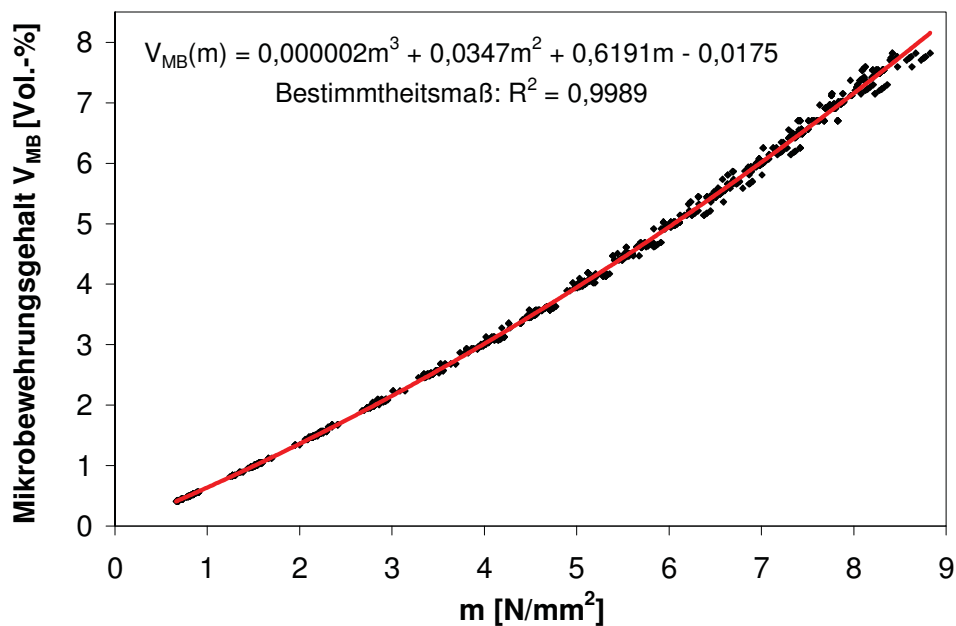
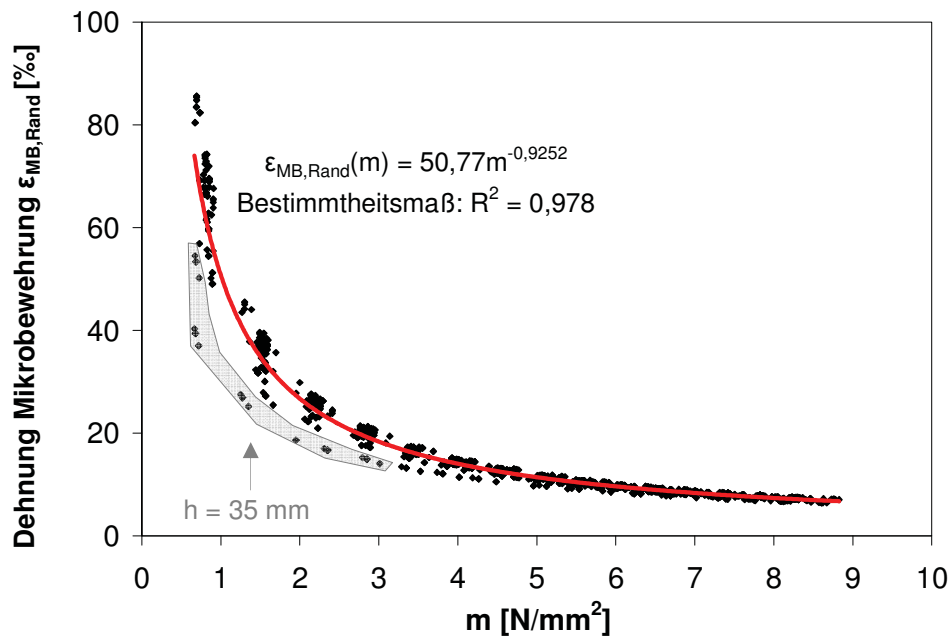
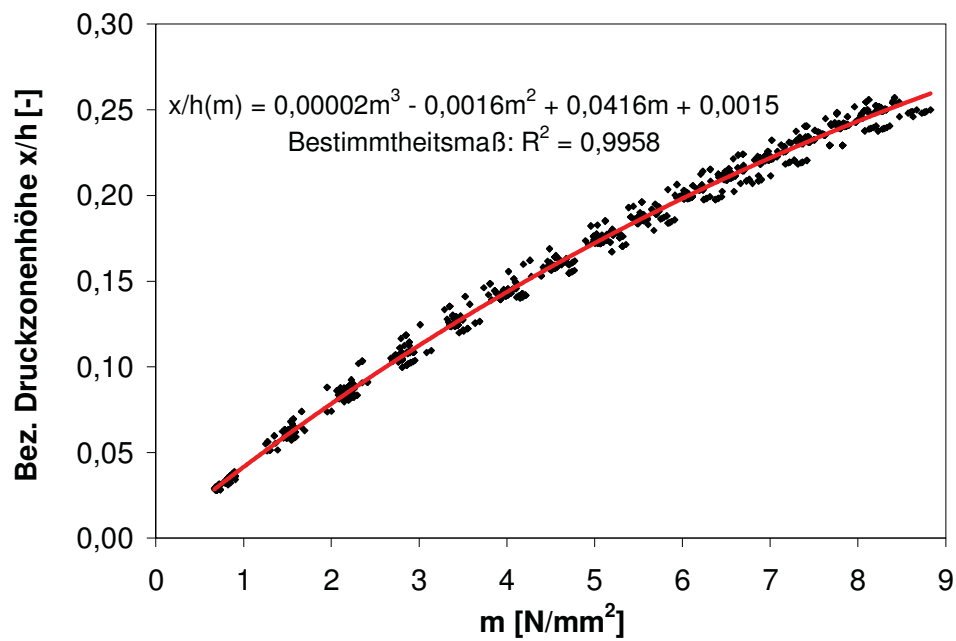


Abbildung 6.3: Beziehung $V_{MB}(m)$ für Stahltyp 3

Abbildung 6.4: Beziehung $\varepsilon_{MB,Rand}(m)$ für Stahltyp 3Abbildung 6.5: Beziehung $x/h(m)$ für Stahltyp 3

Die Näherungsfunktionen zur mathematischen Beschreibung der Zusammenhänge wurden unter Anwendung der "Methode der kleinsten Quadrate" ermittelt. Dabei wurden polynomische Funktionen dritten Grades für die Funktionen $V_{MB}(m)$ und $x/h(m)$ bzw. eine Potenzfunktion für die Abhängigkeit $\varepsilon_{MB,Rand}(m)$ angesetzt. Das Bestimmtheitsmaß R^2 ist ebenfalls angegeben und zeigt die gute Übereinstimmung der gewählten Funktionen mit den Einzelwerten. Die größten Abweichungen zwischen der Näherungsfunktion und den Einzelwerten existieren für die berechneten Dehnungen der äußersten Lage der Mikrobewehrung $\varepsilon_{MB,Rand}(m)$ für Querschnitte mit geringer Höhe ($h = 35 \text{ mm}$) in Kombination mit niedrigen Mikrobewehrungsgehalten (Abbildung 6.4). Der Grund dafür ist das bei dieser Kombination relativ große Verhältnis des Randabstandes der Mikrobewehrung zur Querschnittshöhe. Für größere Querschnittshöhen verliert dieser Einfluss zunehmend an Bedeutung, sodass die entwickelten Bemessungstabeln (Abbildung 6.6 und Tabelle C 2.1 in Anhang C2) auch für Rechteckquerschnitte mit Abmessungen größer als 600 mm anwendbar sind. Für Bauteilabmessungen kleiner als 35 mm wird zur Bestimmung von $\varepsilon_{MB,Rand}(m)$ empfohlen, das Iterationsverfahren nach Abbildung 4.24 anzuwenden.

In Abbildung 6.6 ist die Bemessungstafel für den im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Stahltypen (Stahl 1) angegeben. Weitere Bemessungswerte höherwertiger Stähle sind in Anhang C1 angegeben. Es wird vorausgesetzt, dass ausschließlich geschweißte Drahtgittermatten zum Einsatz kommen, bei denen davon ausgegangen werden kann, dass die Eigenschaften der Drähte in beiden Richtungen identisch sind.

Die Ermittlung der Biege widerstände erfolgt nach Kapitel 4.4, allerdings aufgrund der Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit auf der sicheren Seite ohne Ansatz der Zugfestigkeit der UHPC-Matrix. Die Bemessungsdruckfestigkeit wird innerhalb der Bemessungstafel gemäß Abbildung 6.1 angesetzt.

Für eine Anwendung der Bemessungstafel wird zunächst der Hilfwert m gemäß Gleichung (6.6) bestimmt, der als Eingangswert der Tafel dient, wobei $M = M_{Ed}$ gesetzt wird. Der zu der Hilfsgröße m zugehörige erforderliche Volumenanteil an Mikrobewehrung im UHPC kann direkt in Abhängigkeit der Stahlgüte abgelesen werden. Hierbei handelt es sich um den gesamten Stahlgehalt V_{MB} des Biegebauteils unabhängig von der Ausrichtung der Mikrobewehrungsmatten. Aufgrund quadratischer Maschenweiten beträgt der Effizienzfaktor der Mikrobewehrung stets 0,5, zudem wurde zur Erstellung der Bemessungstafel eine gleichmäßige Verteilung der Mikrobewehrungsmatten über den gesamten Querschnitt (keine Konzentration von Mikrobewehrungsdrähten am Rand oder ähnliche Anordnungen) vorausgesetzt. Der Randabstand (Betonüberdeckung) der

Drähte beträgt, ebenso wie der Abstand der Mikrobewehrungsmatten untereinander, mindestens einen Drahtdurchmesser.

Die erforderliche Anzahl n an Mikrobewehrungsmatten ergibt sich über

$$V_{MB} = \frac{A_{MB} \cdot N_L \cdot n \cdot 2}{b \cdot h} \quad (6.7)$$

mit der Anzahl der Längsdrahte je Mikrobewehrungsmatte für eine horizontale Ausrichtung

$$N_L = \frac{b}{l_{MW}} \quad (6.8)$$

bzw. für eine vertikale Anordnung der Mikrobewehrungsmatten

$$N_L = \frac{h}{l_{MW}} \quad (6.9)$$

zu

$$n = \frac{V_{MB} \cdot 2 \cdot h \cdot l_{MW}}{\pi \cdot \varnothing_{MB}^2} \quad \text{für eine horizontale Ausrichtung der Mikrobewehrung} \quad (6.10)$$

und zu

$$n = \frac{V_{MB} \cdot 2 \cdot b \cdot l_{MW}}{\pi \cdot \varnothing_{MB}^2} \quad \text{für eine vertikale Ausrichtung der Mikrobewehrung,} \quad (6.11)$$

wobei V_{MB} als dimensionslose Größe [-] und die restlichen Werte dimensionsgetreu einzusetzen sind.

m [N/mm ²]	Stahl 1		
	V _{MB} [Vol.-%]	ε _{MB,Rand} [‰]	x/h [-]
0,3	0,34	168,1	0,012
0,4	0,50	128,7	0,016
0,5	0,66	104,5	0,020
0,6	0,83	88,2	0,025
0,7	1,00	76,4	0,029
0,8	1,17	67,5	0,033
0,9	1,34	60,5	0,037
1,0	1,51	54,8	0,040
1,1	1,69	50,2	0,044
1,2	1,87	46,3	0,048
1,3	2,05	43,0	0,052
1,4	2,23	40,1	0,056
1,5	2,42	37,6	0,059
1,6	2,61	35,4	0,063
1,7	2,79	33,5	0,066
1,8	2,98	31,7	0,070
1,9	3,18	30,2	0,073
2,0	3,37	28,8	0,077
2,1	3,56	27,5	0,080
2,2	3,76	26,3	0,083
2,3	3,96	25,3	0,087
2,4	4,15	24,3	0,090
2,5	4,35	23,4	0,093
2,6	4,55	22,5	0,096
2,7	4,76	21,8	0,099
2,8	4,96	21,0	0,102
2,9	5,16	20,4	0,105
3,0	5,37	19,7	0,108
3,1	5,57	19,1	0,111
3,2	5,78	18,6	0,114
3,3	5,98	18,1	0,117
3,4	6,19	17,6	0,120
3,5	6,40	17,1	0,122
3,6	6,60	16,6	0,125
3,7	6,81	16,2	0,127
3,8	7,02	15,8	0,130
3,9	7,22	15,5	0,133
4,0	7,43	15,1	0,135
4,1	7,64	14,8	0,137
4,2	7,85	14,4	0,140
4,3	8,05	14,1	0,142

Abbildung 6.6: Bemessungstafel für mikrobewehrte UHPC-Bauteile (Rechteckquerschnitt), Stahl 1

Alternativ kann die erforderliche Mattenanzahl auch dem nachfolgenden Diagramm (Abbildung 6.7) entnommen werden. In Anhang C3 sind die Diagramme zu einer besseren Übersichtlichkeit getrennt für verschiedene Durchmesser der Mikrobewehrungsdrähte angegeben.

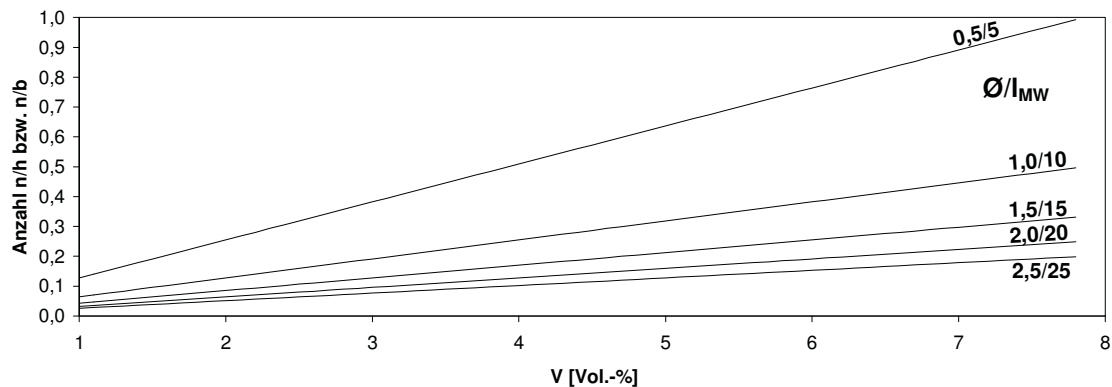


Abbildung 6.7: Erforderliche Mikrobewehrungsmattenanzahl für typische Mattengeometrien

Dunkelgrau eingefärbte Bereiche der Bemessungstafel (Abbildung 6.6) bedeuten, dass das maximal aufnehmbare Moment des Querschnitts M_{Rd} unterhalb des Rissmomentes M_{cr} liegt. Hellgrau hinterlegte Zeilen der Bemessungstafel kennzeichnen, dass für diese Mikrobewehrungsgehalte das Rissmoment M_{cr} oberhalb des Fließmomentes M_{yd} liegt. Aufgrund der relativ hohen Matrix-Zugfestigkeit des UHPC ist ein vergleichsweise hoher Stahlgehalt erforderlich, um allein das Rissmoment aufnehmen zu können. Aus diesem Grund ist der Einsatz eines hochfesten Stahls in Kombination mit dem UHPC durchaus sinnvoll.

Zudem beinhaltet die Bemessungstafel zur Beurteilung der Querschnittsausnutzung die Stahldehnung der äußersten Mikrobewehrungslage $\epsilon_{MB,Rand}$ sowie die bezogene Druckzonenhöhe x/h .

Zur Sicherstellung eines duktilen Bauteilverhaltens bei Erstriss wird im Stahlbetonbau eine Mindestbewehrung, durch die die Risskraft aufgenommen werden kann nach Gleichung (6.12) angeordnet.

$$A_{s,min} = \frac{f_{ct} \cdot A_c}{f_{yk}} \quad (6.12)$$

Für Biegebauteile aus mikrobewehrtem UHPC (ohne zusätzliche Bewehrung in Form von Stabstahl) ist ebenfalls eine Mindestbewehrung zur Gewährleistung eines duktilen Bauteilversagens erforderlich. Infolge der gegenüber Normalbeton hohen zentrischen Zugfestigkeit f_{ct} resultiert für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersuchte

UHPC-Mischung ein entsprechend höherer erforderlicher Querschnitt an Mindestbewehrung als für Normalbetone. Die Verwendung hochwertiger Stahlgüten in Kombination mit der leistungsfähigen UHPC-Matrix erweist sich zur Minimierung der Mindestbewehrung als besonders günstig.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde auf Basis umfassender experimenteller Untersuchungen der Ersatz von Mikrodrahtfasern, die herkömmlich zur Gewährleistung der Duktilität in UHPC verwendet werden, durch eine Mikrobewehrung untersucht. Ein Ersatz der Fasern ist aus mehreren Gründen anzustreben. Einen wesentlichen Anlass stellen dabei die innerhalb der UHPC-Matrix zufällige Ausrichtung und Verteilung der Mikrodrahtfasern dar. Diese erfordern zur Bemessung von Bauteilen aus mikrodrahtfaserbewehrtem UHPC eine Berücksichtigung der hohen Streuung und Unsicherheiten und daher hohe Sicherheits- und Abminderungsfaktoren. Die vorgestellte Mikrobewehrung in Mattenstruktur aus geschweißten Einzeldrähten wird vor dem Einfüllen des UHPC in die Schalung eingebaut und ist somit in Lage und Ausrichtung genau bekannt, was einen effizienten Einsatz ermöglicht.

Die durchgeführten Untersuchungen gliedern sich somit in zwei Themen:

- **Ersatz der Fasern durch Mikrobewehrung** - Um eine Aussage über den Ersatz von Mikrodrahtfasern durch eine Mikrobewehrung treffen zu können, wurden zunächst experimentelle Untersuchungen zum Druck-, Zug-, und Biegetragverhalten un- und faserbewehrter UHPC Kleinbauteile durchgeführt, die anschließend die Basis für einen Vergleich des Tragverhaltens darstellen. Nachfolgend wurden die gleichen Untersuchungen an mikrobewehrten UHPC Proben mit identischem Stahlgehalt und einer Mikrobewehrung (S235) vom Typ MB1, mit Drahtdurch-

messer von 1,0 mm und lichter Maschenweite von 10 mm, durchgeführt. Bezüglich der Druckfestigkeitserhöhung gegenüber unbewehrtem UHPC im Alter von 28 Tagen beträgt der Einfluss der Fasern 25 %, der Einfluss einer Mikrobewehrung sogar 33 %. Die wesentliche Steigerung der Druckfestigkeit durch die Mikrobewehrung ist Folge einer gezielten günstigen Ausrichtung zur Aufnahme von Querspannungen. Das Versagen unter Verwendung beider Bewehrungsarten erfolgt mit Vorankündigung. Im zentrischen Zugversuch liegt für den verwendeten Stahlgehalt von 2,4 Vol.-% und Fasern mit einem Durchmesser von 0,15 mm und einer Länge von 9 mm ein unterkritischer Stahlgehalt vor. Nach Erreichen des Erstrisses kommt es zu einer anwachsenden Rissöffnung mit einem Faserauszug aus der Matrix, wobei die maximale Rissöffnung der halben Faserlänge entspricht. Auch die verwendete Mikrobewehrung ist bei identischem Stahlgehalt nicht in der Lage, die Risskraft zu steigern. Nach dem Erstriss plastifizieren die Drähte im Riss und das Versagen tritt durch Reißen der Drähte ein. Aufgrund des starren Verbundes der Längsdrähte an den Kreuzungspunkten mit den Querdrähten werden die Mikrobewehrungsdrähte nicht aus der UHPC-Matrix herausgezogen. Dieser Unterschied im Versagen ist ebenfalls für die untersuchten Biegekörper zu erkennen. Hinsichtlich der maximalen Biegetragfähigkeit unterscheiden sich die faser- und mikrobewehrten Proben für den Stahlgehalt von rund 2,5 Vol.-% nicht. Hierbei kann die Optimierung durch Einsatz einer Mikrobewehrung klar herausgestellt werden, da die Fasern eine Zugfestigkeit von 2200 N/mm^2 aufweisen, während die Zugfestigkeit der eingesetzten Mikrobewehrung lediglich 380 N/mm^2 beträgt. Für den Einsatz einer höherfesten Mikrobewehrung bei gleichbleibendem Stahlgehalt ließe sich die Biegetragfähigkeit weiter steigern. Ebenfalls ließe die Verwendung einer höherfesten Mikrobewehrung eine Steigerung der Steifigkeit im ansteigenden Ast der Last-Verformungs-Linie, vergleichbar zu der des mikrodrahtfaserbewehrten UHPC, durch eine höhere Fließspannung zu. Neben den Aspekten der Tragfähigkeit wurden auch die Dauerhaftigkeitseigenschaften von mikro- und faserbewehrtem UHPC mit Hilfe des CDF Tests miteinander verglichen. Hinsichtlich der Abwitterung und inneren Schädigung liefern beide Bewehrungsarten für die dichte UHPC-Matrix vergleichbar gute Ergebnisse. Während faserbewehrter UHPC Rostfahnen an der Oberfläche aufweist und einzelne, senkrecht zur Prüfoberfläche durch die Abwitterung der Zementleimschicht herausstehende, korrodierte Fasern zu erkennen sind, genügt eine nur 5 mm dünne Überdeckung der Mikrobewehrung, um dies zu verhindern. Zusammenfassend stellt die Mikrobewehrung einen adäquaten Ersatz für Mikrodrahtfasern in UHPC zur Gewähr-

leistung der Duktilität dar, ohne die Nachteile dieser Mikrodrahtfasern aufzuweisen.

- **Tragverhalten des mikrobewehrten UHPC** - Mit dem Ziel, ein Bemessungsmodell für den mikrobewehrten UHPC zu entwickeln, wurde in Analogie zum Stahlbetonbau zunächst das Materialverhalten der einzelnen Verbundkomponenten in Form von Spannungs-Dehnungs-Linien bzw. der Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung sowie das Verbundverhalten experimentell ermittelt. Aus diesen Untersuchungen ging eine Abhängigkeit des Tragverhaltens insbesondere von der Maschenweite der Mikrobewehrungsmatten hervor, da diese das Verbundverhalten maßgeblich beeinflusst. Während der glatte Mikrobewehrungsdraht, wie die Mikrodrahtfasern, aus der UHPC Matrix herausgezogen wird, folgt aus der Verwendung einer Maschenstruktur in den geschweißten Kreuzungspunkten der Längs- und Querdrähte ein starrer Verbund zum umgebenden UHPC. Während die Maschenweite der Mikrobewehrung einen starken Einfluss auf die Trag- und Verformungseigenschaften besitzt, ist der Einfluss des Drahtdurchmessers von untergeordneter Bedeutung. Eine für Biegebalken variierte Ausrichtung der Mikrobewehrung in Form eines vertikalen bzw. horizontalen Einbaus der Drahtgittermatten zeigt für den vertikalen Einbau eine Verbesserung der Querkrafttragfähigkeit durch die vertikalen Drähte. Daneben ist die Steifigkeit für diese Ausrichtung erhöht, sodass je nach Einsatzgebiet eine passende Ausrichtung gewählt werden kann. Es ist zu berücksichtigen, dass die Mikrobewehrungsmatten der Druckzone bei einer horizontalen Ausrichtung unter großen Verformungen ausknicken können. Dieses sowie alle weiteren Versagensmechanismen werden auch mit dem entwickelten Finite-Elemente-Modell, dessen Grundlage vor allem die Materialdefinitionen aus den Einzelversuchen darstellen, gut abgebildet. Damit wird gezeigt, dass die Bemessung des mikrobewehrten UHPC durch die bekannte Lage und Ausrichtung der Längs- und Querdrähte ohne zusätzliche, die Tragfähigkeit abmindernde Effizienzfaktoren möglich ist. Auf dieser Basis wird in Analogie zum Stahlbetonbau ein Bemessungsmodell zur Bestimmung der Druck-, Zug- und Biegetragfähigkeit vorgestellt. Die entwickelten Bemessungstabellen für Rechteckquerschnitte unter reiner Biegebeanspruchung für unterschiedliche Stahlgüten in Kombination mit den grafischen Hilfsmitteln zur Bestimmung der erforderlichen Anzahl an Mikrobewehrungsmatten in Abhängigkeit von Maschenweite und Durchmesser erlauben eine einfache Anwendung des Verbundmaterials.

7.2 Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden insbesondere das Druck,- Zug,- und Biegetragverhalten von mikrobewehrtem UHPC untersucht und in ersten Ansätzen die positive Auswirkung der vertikalen Ausrichtung der Mikrobewehrungsmatten auf die Querkrafttragfähigkeit festgestellt. Voruntersuchungen [ScPr12] bestätigen die Wirksamkeit der Querdrähte bei vertikaler Ausrichtung der Mikrobewehrung. Hieran anschließend ließe sich unter Verwendung des vorgestellten Modells in Kombination mit experimentellen Untersuchungen zur Querkrafttragfähigkeit, ein Modell zur Berücksichtigung der Querkrafttragfähigkeit erstellen. Neben der detaillierten Untersuchung der Querkrafttragfähigkeit und deren einzelner Traganteile besteht noch Forschungsbedarf hinsichtlich des Einflusses der verformungsrelevanten Langzeiteffekte Kriechen und Schwinden sowie bezüglich des Maßstabeffektes.

Für einen praxistauglichen Einsatz der vorgestellten Abstandhalter ist entweder eine selbstverdichtende und insbesondere selbstentlüftende UHPC-Feinkornmischung zu entwickeln, sodass der Prozess des Rüttelns entfallen kann, oder eine Optimierung der Abstandhalter zur Lagesicherung der Mikrobewehrungsmatten vorzunehmen. Mit dem Fortschritt der Technologie des dreidimensionalen Drucks ist auch die Erstellung ganzer Drahtkörper zum Einbau in die Schalung denkbar.

Da der Tragwiderstand des Verbundmaterials weitestgehend durch das Materialverhalten der Mikrobewehrung bestimmt wird, wird zur Steigerung der Tragfähigkeit gering bewehrter Balken die Verwendung einer höherfesten Mikrobewehrung vorgeschlagen. Diese stellt einen idealen Partner zur leistungsstarken UHPC-Matrix dar.

Die Querdrähte der Mikrobewehrung besitzen eine rissinitiierende Wirkung. Unter Verwendung kleinerer Maschenweiten resultiert ein geringerer Rissabstand mit kleineren zugehörigen Rissbreiten. Die kleinste experimentell untersuchte Maschenweite beträgt 10 mm. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass eine weitere Verringerung der Maschenweite auf unter 10 mm die Rissabstände ungünstig beeinflusst und damit zu einer Vergrößerung der Rissbreiten führt.

Die möglichen Einsatzgebiete des mikrobewehrten UHPC sind aufgrund der Kombination aus perfekten Dauerhaftigkeitseigenschaften, hohem Tragwiderstand, gutmütigen Verformungseigenschaften und der Möglichkeit der Herstellung sehr filigraner Strukturen vielfältig. Zum Beispiel ist eine dünne Querschnittergänzung bestehender Bauteile zur Erhöhung des Anprallschutzes denkbar. Aufgrund der hohen Dichtigkeit können

beispielsweise Leitmauern oder Brückenpfeiler auf Autobahnen im chloridbeanspruchten Bereich auf diese Weise verstärkt werden. Weiterhin ist der Einsatz für filigrane Fertigteile (von wenigen Zentimetern) für entweder architektonisch anspruchsvolle Bauteile oder für einen Ersatz von Stahlprofilen denkbar. Hierzu wurde bereits in einer Voruntersuchung der Einsatz von mikrobewehrtem UHPC für dauerhafte Spundwandprofile insbesondere in Küstengebieten in Kombination mit Vorspanngliedern studiert [ScPrH11]. Aufgrund des hohen plastischen Verformungsvermögens wird vorgeschlagen, den mikrobewehrten UHPC bei Systemen mit der Möglichkeit einer Schnittgrößenumlagerung einzusetzen, damit die Reserven der Plastifizierung effizient genutzt werden können. In diesem Zusammenhang scheint auch eine Anwendung für Bauteile unter dynamischer Beanspruchung (Erdbeben, Explosionseinwirkung) sinnvoll.

Literaturverzeichnis

- [ACI82] ACI Committee 549: State-of-the-art Report on Ferrocement. Concrete International, Detroit, USA (3rd edn), Report No. ACI 549R-82 4, 1982.
- [ACI88] ACI Committee 549: Guide for the Design, Construction, and Repair of Ferrocement. ACI Structural Journal, Mai/Juni 1988, S. 325 - 351.
- [ACI97] ACI Committee 549: State-of-the-Art Report on Ferrocement. American Concrete Institute, Report No. ACI 549R-97, 1997.
- [AdvC73] Advisory Committee on Technological Innovation, Board on Science and Technology for International Development, Office of the Foreign Secretary: Ferrocement: Application in Developing Countries. Washington, D. C., USA, 1973.
- [AFGC13] Association Française de Génie Civil (AFGC): Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concrets: Recommendations. Report, Paris, Frankreich, 2013.
- [Al08] Aldejohann, M.: Zum Querkrafttragverhalten von Hohlkörperdecken mit zweiachsiger Lastabtragung. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2008.
- [Ba87] Bache, H. H.: Introduction to Compact Reinforced Composites. In: Nordic Concrete Research, No. 6, 1987, S. 19 - 33.
- [BaOh83] Bazant Z. P., Oh, B. H.: Crack band theory for fracture of concrete. In: Materials and Structures, No. 16, 1983, S. 155 - 177.
- [Bay91] Bayer, E.: Ferciment – Ferrocemento – Ferrocement. Baukultur: Technik, Wissenschaft, Kunst, Umwelt, Nr. 2, S. 21 - 25, 1991.

- [Beh96] Behloul, M.: Analyse et modélisation du comportement d'un matériau à matrice cimentaire fibrée à ultra hautes performances. PhD thesis, E. N. S. Cachan, France, 1996.
- [BuEm16] Busse, D., Empelmann, M.: Dünnwandige, mikrobewehrte Betonbauteile unter Querkraftbeanspruchung. In: Beton- und Stahlbetonbau 111, Heft 12, 2016, S. 840 - 850.
- [Bon96] Bonneau, O., Poulin, C., Dugat, J., Aitcin, P.-C.: Reactive Powder Concretes - From Theory to Practice. In: Concrete International, Vol. 18, Issue 4, April 1996, S. 47 - 49.
- [Bor04] Bornemann, R., Faber, S.: UHPC with steel- and non-corroding high-strength polymer fibres under static and cyclic loading. In: Ultra High Performance Concrete (UHPC), Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance concrete (Hrsg.: Schmidt, M., Fehling, E., Geisenhanslücke, C.), Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 3, Universität Kassel, 2004, S. 673 - 681.
- [Bow75] Bowen, G. L.: A New Mesh for Ferrocement Construction – Watson Mesh. Journal of Ferrocement, Vol. 5, No. 1, 1975, S. 5 - 20.
- [Bra06] Brameshuber, W.: Textilbewehrter Beton – ein neuer Verbundwerkstoff. 3. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung „Innovationen in der Betonbautechnik“, Karlsruhe, 2006.
- [CMF95] Cheyrezy, M., Maret, V., Frouin, L.: Microstructural Analysis of RPC (Reactive Powder Concrete). In: Cement and Concrete Research 25, 1995, S. 1491 - 1500.
- [CoHo86] Cornelissen, H. A. W., Hordijk, D. A., Reinhardt, H. W.: Experimental determination of crack softening characteristics of normalweight and lightweight concrete. Heron, Vol. 31, No. 2, 1986.
- [CuSp02] Curbach, M., Speck, K.: Mehraxiale Festigkeit von duktilem Hochleistungsbeton. DAfStb Heft 524, Beuth Verlag, 2002.
- [DIA09] DIANA User's Manual. Release 9.4, first edition, TNO, Delft, 2009.
- [DIN206] DIN EN 206: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Ausgabe 01/2017.

- [DIN1048] DIN 1048-5: Prüfverfahren für Beton; Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper. Ausgabe 06/1991.
- [DIN1990] DIN EN 1990: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung, Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010, Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 10/2010.
- [DIN1992] DIN EN 1992-1-1: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau mit DIN EN 1992-1-1/A1:2015-03: A1-Änderungen, Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 01/2011.
- [DIN1992NA] DIN EN 1992-1-1/NA: Eurocode 2: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau mit DIN EN 1992-1-1/NA/A1:2015-12: A1-Änderungen, Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 04/2013.
- [DIN6892] DIN EN ISO 6892-1: Metallische Werkstoffe – Zugversuch – Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur. Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 12/2009.
- [DIN12350-7] DIN EN 12350-7: Prüfung von Frischbeton – Teil 7: Luftgehalt - Druckverfahren. Ausgabe 08/2009.
- [DIN12390-1] DIN EN 12390-1: Prüfung von Festbeton – Teil 1: Form, Maße und andere Anforderungen für Probekörper und Formen. Ausgabe 12/2012.
- [DIN12390-2] DIN EN 12390-2: Prüfung von Festbeton – Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen. Ausgabe 08/2009.
- [DIN12390-3] DIN EN 12390-3: Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern. Ausgabe 07/2009.
- [DIN12390-9] DIN CEN/TS 12390-9: Prüfung von Festbeton – Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand – Abwitterung. Ausgabe 08/2006.
- [deLa92] De Larrard, F.: Ultrafine Particles for Making Very High Performance Concretes. In: High Performance Concrete – From Material to Structure, herausgegeben von Malier, Y., veröffentlicht durch E & FN Spon, 1992, S. 34 - 47.

- [DrPr52] Drucker, D. C., Prager, W.: Soil Mechanics and Plastic Analysis or Limit Design. Quarterly of Applied Mathematics 10, 1952, S. 157 - 165.
- [Du91] Duda, H.: Bruchmechanisches Verhalten von Beton unter monotoner und zyklischer Zugbeanspruchung. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb). Heft 419, Beuth Verlag, Berlin, 1991.
- [EdHa72] Edgington, J., Hannant, D. J.: Steel Fibre Reinforced Concrete: The Effect on Fibre Orientation of Compaction by Vibration. In: Matériaux et Constructions 5, 1972, S. 41 - 44.
- [EmTe09] Empelmann, M., Teutsch, M.: Faserorientierung und Leistungsfähigkeit von Stahlfaser- sowie Kunststofffaserbeton. Beton 59 (2009), Heft 6, S. 254 - 259.
- [Falk97] Falkner, H.: HH-Columns – Tall Building Columns with Steel Fibre Reinforced High Strength Concrete and High Strength Steel. International Conference – Trends in Tall Building, Technische Universität Darmstadt, 5. bis 7. September 2001.
- [FeBo93] Feenstra, F. H., De Borst, R.: Aspects of Robust Computational Modeling for Plain and Reinforced Concrete. Vol. 38, No. 4, HERON, Delft, Niederlande, 1993.
- [FeLeu11] Fehling, E., Leutbecher, T.: Bemessung von Bauteilen aus UHPC. Vortrag im Rahmen des 9. Münchener Baustoffseminars, München, 2011.
- [FeSc05] Fehling, E., Schmidt, M., Teichmann, T., Bunje, K., Bornemann, R., Middendorf, B.: Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultra-Hochfester Betone (UHPC). Forschungsbericht DFG FE 497/1-1, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 1, Universität Kassel, 2005.
- [FeSW13] Fehling, E., Schmidt, M., Walraven, J., Leutbecher, T., Fröhlich, S.: Ultrahochfester Beton UHPC. In: Beton-Kalender 2013: Lebensdauer und Instandsetzung - Brandschutz, Band 2, 2013, S. 119 - 239.
- [Fre11] Frettlöhr, B.: Bemessung von Bauteilen aus ultrahochfestem Feinkornbeton. Dissertation, Universität Stuttgart, 2011.

- [GoGi00] Gowripalan, N., Gilbert, R. I.: Design Guidelines for Ductal Reactive Prestressed Concrete Beams. Design Guide, School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales, Sydney, Australien, 2000.
- [GrWK01] Grübl, P., Weigler, H., Karl, S.: Beton – Arten, Herstellung und Eigenschaften. Hrsg. Kupfer, K., 2. Auflage, Ernst und Sohn Verlag, 2001.
- [HaFa92] Hackman, L. E., Farrell, M. B. Dunham, O. O.: Slurry Infiltrated Mat Concrete (SIMCON). Concrete International, Vol. 14, Ausgabe 12, 1992, S. 53 - 56.
- [Hau99] Hauser, S. Hochfester Fasermattenbeton – SIMCON NEU / DUCON. Dissertation, TU Darmstadt, 1999.
- [Hau17] Hauser, S.: DUCON - Mikrobewehrter Hochleistungsbeton. In: Beton-Kalender 2017, Band 2, 2017, S. 493 - 517.
- [HiMoPe76] Hillerborg, A., Modeer, M., Petersson, P. E.: Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. In: Cement and Concrete Research No. 6, 1976, S. 773 - 782.
- [HoDK11] Holschemacher, K., Dehn, F., Kluge, Yvette: Grundlagen des Faserbetons. In: Beton-Kalender 2011: Kraftwerke, Faserbeton, Band 2, 2011, S. 50.
- [Hor91] Hordijk, D. A.: Local Approach to Fatigue of Concrete. Dissertation, Technische Universität Delft, Niederlande, 1991.
- [IFS01] IFS Committee 10: Ferrocement Model Code. Building Code Recommendations for Ferrocement. International Ferrocement Society, 2001.
- [JSCE06] Japan Society of Civil Engineers: Recommendations for Design and Construction of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Structures (Draft). 2006.
- [JuMu04] Jungwirth, J., Muttoni, A.: Versuche zum Tragverhalten von ultra hochfestem Beton, Teil 1 - Materialversuche. Projekt 00.20, Bericht 00.02.R3, EPFL, Lausanne, März 2004.
- [KaKa86] Kameswara Rao, C. B., Kamasundara Rao, A.: Stress-Strain Curve in Axial Compression and Poisson's Ratio of Ferrocement. In: Journal of Ferrocement, Vol. 16, No. 2, April 1986.

- [Ko00] Kooiman, A. G.: Modelling Steel Fibre Reinforced Concrete for Structural Design. Technische Universität Delft, Niederlande, 2000.
- [Kö01] König, G., Tue, N., Zink, M.: Hochleistungsbeton – Bemessung, Herstellung, Anwendung. Ernst und Sohn Verlag, Berlin, 2001.
- [Lan84] Lankard, D. R.: Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON). Concrete International, Vol. 6, Ausgabe 12, 1984, S. 44 - 47.
- [Leu07] Leutbecher, T.: Rissbildung und Zugtragverhalten von mit Stabstahl und Fasern bewehrtem Ultrahochfestem Beton (UHPC). Dissertation, Universität Kassel, 2007.
- [Li94] Li V. C., Chan, Y.-W.: Determination of Interfacial Debond Mode for Fiber-Reinforced Cementitious Composites. In: Journal of Engineering Mechanics, Vol. 120, No. 4, April, 1994, S. 707-719.
- [Lin99] Lin, Y.: Tragverhalten von Stahlfaserbeton. DAfStb-Heft 494, Beuth Verlag, Berlin, 1999.
- [Ma10] Ma, J.: Faserfreier Ultrahochfester Beton - Entwicklung und Materialeigenschaft, Dissertation, Leipzig, April 2010.
- [Mas08] Mazanec, O., Schießl, P.: Mixing Time Optimization for UHPC. In: Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, März 2008, S.401 - 408.
- [MaSW03] Ma, J., Schneider, H., Wu, Z.: Bruchmechanische Kenngrößen von UHFB. In: Innovationen im Bauwesen: Ultrahochfester Beton. Hrsg.: König, G., Holschemacher, K., Dehn, F., Berlin, 2003, S. 121 - 130.
- [MC10] Fédération Internationale du Béton (fib): Model Code 2010. fib Bulletin 51, März 2010.
- [MC90] Comité Euro-International du Béton: CEB-FIP Model Code 1990. Ausgabe August 1993.
- [MCFC01] International Ferrocement Society (IFS) Committee 10: Ferrocement Model Code – Building Code Recommendations for Ferrocement. 2001.
- [Mi87] Van Mier, J. G. M.: Examples of Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Structures with DIANA. Vol. 32, No. 3, HERON, Delft, 1987.

- [Mil08] Miloud, B.: Permeability and Porosity as Essential Factors in the Long-term Durability of Steel Fibre Reinforced Concrete. In: Proceedings of the 11th International Conference on Durability of Building Materials and Components, Türkei, 2008.
- [MüS11] Müller, H. S., Scheydt, J. C.: Dauerhaftigkeit und Nachhaltigkeit von ultrahochfestem Beton. In: Beton (9), 2011, S. 336 - 343.
- [Na98] Naaman, A. E., Guerrero, P.: Bending Behavior of Hybrid Ferrocement Composites. Ferrocement 6 - Lambot Symposium, Proceedings of Sixth International Symposium on Ferrocement, Naaman, A. E., Editor, University of Michigan, USA, Juni 1998.
- [Na00] Naaman, A. E.: Ferrocement and Laminated Cementitious Composites. Techno Press 3000, Ann Arbor, USA, 2000.
- [Na01] Naaman, A. E.: Ferrocement and Thin Fiber Reinforced Cement Composites: Looking Back, Looking Ahead. Journal of Ferrocement, Vol. 31, No.4, Oktober 2001.
- [Na06] Naaman, A. E.: Ferrocement and Thin Reinforced Cement Composites: Four Decades of Progress. Journal of Ferrocement, Vol. 36, No.1, Januar 2006.
- [Ne06] Neff, C.: Ein Ingenieurmodell zur Bemessung von Stahlbeton- und Spannbetonträgern mit Öffnungen. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2006.
- [NeFe05] Nerves, R. D., Fernades de Almeida, J. C. O.: Compressive Behaviour of Steel Fibre Reinforced Concrete. Structural Concrete, 6, 2005, No.1, S. 1-8.
- [PaSe08] Palecki, S., Setzer, M. J.: Ultra-high-performance concrete under frost and deicing salt attack. Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, 2008.
- [PaSL74] Pama, R. P., Sutharatnachaiyaporn, C., Lee, S. L.: Rigidities and Strength of Ferrocement. In: Proceedings of the first Australian Conference on Engineering Materials, Sydney, Australien, 1974, S. 287 - 308.
- [Pf03] Pfyl, T.: Tragverhalten von Stahlfaserbeton. Dissertation, ETH Zürich, 2003.

- [Rei01] Reinhardt, H.-W. et al: Sachstandsbericht Selbstverdichtender Beton (SVB). DAfStb Heft 516, Beuth Verlag, 2001
- [ReiGr04] Reineck, K.-H., Greiner, S.: Tests on ultra-high performance fibre reinforced concrete for designing hot-water tanks and UHPFRC-shells. In: Schmidt, M., Fehling, E., Geisenhanslücke C. (editors): Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete 2004, Kassel, S. 361 - 374.
- [RiCh95] Richard, P., Cheyrezy, M.: Composition of Reactive Powder Concretes. Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 7, Oktober 1995, S. 1501 - 1511.
- [RIL83] International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures (RILEM): Technical Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials: RC 6, Bond Test for Reinforcement Steel, 2. Pull-out Test, 1983.
- [RStf10] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb): Richtlinie Stahlfaserbeton. Berlin, März 2010.
- [ScFe14] Schmidt, M., Fehling, E., Fröhlich, S., Thiemicke, J.: Nachhaltiges Bauen mit ultra-hochfestem Beton. Ergebnisse des Schwerpunktprogrammes 1182 gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 22, Universität Kassel, 2014.
- [Schm08] Schmidt, M. et al: Sachstandsbericht Ultrahochfester Beton. DAfStb Heft 561, Beuth Verlag, 2008.
- [ScPrH10] Schnellenbach-Held, M., Prager, M., Held, M.: Precast Prestressed Micro-Reinforced UHPC Sheet Piles. In Proceedings of Third International fib Congress incorporating the PCI Annual Convention and Bridge Conference 2010, Washington, DC, USA.
- [ScPr11] Schnellenbach-Held, M.; Prager, M.: Mikrobewehrter Ultrahochleistungsbeton - Trag- und Verformungsverhalten. In: Beton- und Stahlbetonbau 106, Heft 11, 2011, S. 770 - 778.

- [ScPr12] Schnellenbach-Held, M., Prager, M.: Numerical Study on the Shear Behavior of Micro-Reinforced UHPC Beams. In: Proceedings of the 3rd International Symposium on Ultra-High Performance Concrete and Nanotechnology for High Performance Construction Materials HiPerMat 2012, Kassel, March 7–9, 2012.
- [Se06] Setzer, M. J.: CDF/CIF-Test – Korrekte Simulation eines praxisgerechten Frostangriffes im Rahmen einer Laborprüfung. In: Beiträge zur 6. CDF/CIF Fachtagung, Mitteilungen aus dem Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft, Heft 10, Cuvillier Verlag Göttingen, 2006, S. 6 - 14.
- [SeFaJa96] Setzer, M. J., Fagerlund, G., Janssen, D.: CDF-Test – Test Method for the Freeze-Thaw Resistance of Concrete – Tests with sodium chloride solution (CDF). RILEM Recommendation TC 117, Materials and Structures, Vol. 26, 1996, S. 523 - 528.
- [SeVe93] Selby, R. G., Vecchio, F. J.: Three-dimensional Constitutive Relations for Reinforced Concrete. Technical Report 93-02, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Kanada, 1993.
- [SIA2052] Schweizer Ingenieur- und Architektenverein: Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB). Baustoffe, Bemessung und Ausführung. Merkblatt SIA 2052, März 2016.
- [SMü12] Scheydt, J. C., Müller, H. S.: Microstructure of Ultra High Performance Concrete (UHPC) and its Impact on Durability. Schmidt, M.; Fehling, E. et al (editors): Proceedings of the 3rd International Symposium on Ultra High Performance Concrete and Nanotechnology for High Performance Materials, Kassel, März 2012.
- [SoLe90] Soroushian, P., Lee, C.-D.: Distribution and Orientation of Fibers in Steel Fiber Reinforced Concrete. In: ACI Materials Journal 87, American Concrete Institute, 1990, S. 433 - 439.
- [Ste11] Stengel, T.: Faserbewehrung in UHPC. Vortrag, 9. Münchener Baustoffseminar, cbm, TUM, April 2011.

- [StSc14] Stengel, T. and Schießl, P.: Nachhaltigkeitsanalyse von UHPC mit Hilfe von Sachbilanz und Wirkungsabschätzung. In: Schmidt, M., Fehling, E., Fröhlich, S., Thiemicke, J.: Nachhaltiges Bauen mit ultra-hochfestem Beton, Ergebnisse des Schwerpunktprogramms 1182 gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 22, Universität Kassel, 2014.
- [StSc08] Stengel, T. and Schießl, P.: Sustainable Construction with UHPC – from Life Cycle Inventory Data Collection to Environmental Impact Assessment. In: Fehling, E., Schmidt, M., Stürwald, S. (editors): Proceedings of the 2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, März 2008.
- [Swa84] Swamy, R. N. (Hrsg.): New Reinforced Concretes. Concrete Technology and Design. Band 2, Blackie and Son, Glasgow, Vereinigtes Königreich, 1984.
- [ThTJ87] Thorenfeldt, E., Tomaszewicz, A., Jensen, J. J.: Mechanical properties of high-strength concrete and applications in design. In: Proc. Symp. Utilization of High-Strength concrete, Stavanger, Norwegen, 1987.
- [TuSc03] Tue, N. V., Schneider, H.: Besonderheiten bei der Bemessung und der konstruktiven Ausbildung von Bauteilen aus UHPC im Rahmen der Zustimmung im Einzelfall. In: Fehling, E., Schmidt, M.: Ultra-Hochfester Beton - Planung und Bau der ersten Brücke mit UHPC in Europa, Tagungsbeiträge zu den 3. Kasseler Baustoff- und Massivbautagen, Kassel, 2003.
- [VeCo86] Vecchio, F. J., Collins, M. P.: The modified compression field theory for reinforced concrete elements subjected to shear. ACI Journal 83, 22 (1986), S. 219 - 231.
- [VeCo93] Vecchio, F. J., Collins, M. P.: Compression response of cracked reinforced concrete. Journal of Structural Engineering, ASCE 119, 12 (1993), S. 3590 - 3610.
- [WaLi90] Ward, R. J., Li, V. C.: Dependence of Flexural Behavior of Fiber Reinforced Mortar on Material Fracture Resistance and Beam Size. In: ACI Materials Journal, November/Dezember 1990, S. 627 - 637.

- [Wef10] Wefer, M.: Materialverhalten und Bemessungswerte von ultrahochfestem Beton unter einaxialer Ermüdungsbeanspruchung. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2010.
- [WWW1] <http://www.museebrignolais.com/en/a-t-p/> (12.12.2016), Internetauftritt des Museums „Musée du pays Brignolais“.

Anhang A

Experimentelle Untersuchungen

A 1 Materialverhalten der Mikrobewehrung

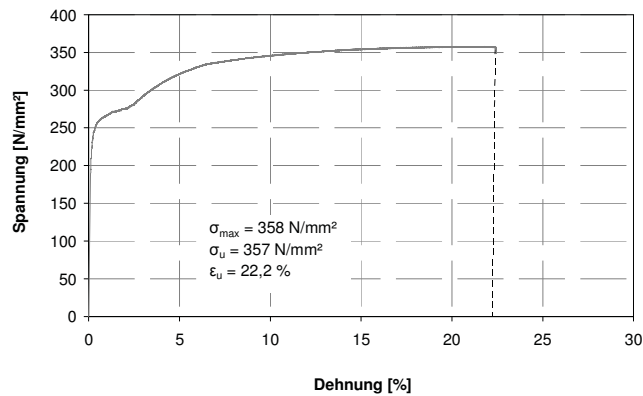


Abbildung A 1.1: Probe 1 – Dehnungszunahmegeschwindigkeit $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$

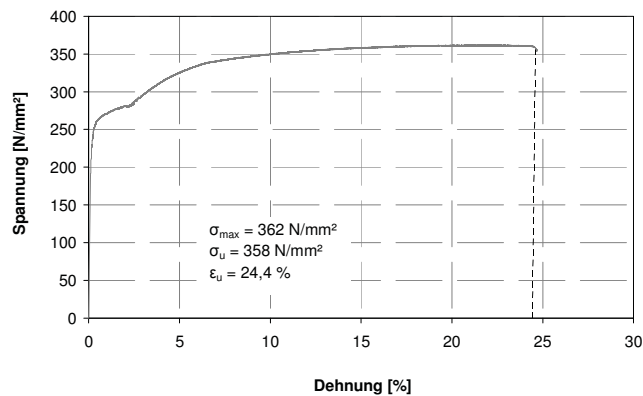


Abbildung A 1.2: Probe 2 – Dehnungszunahmegeschwindigkeit $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$

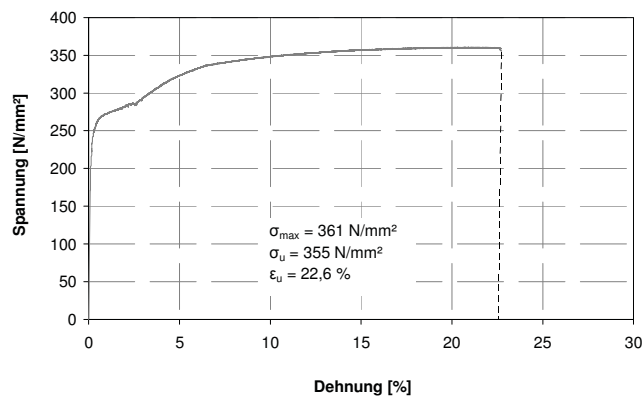
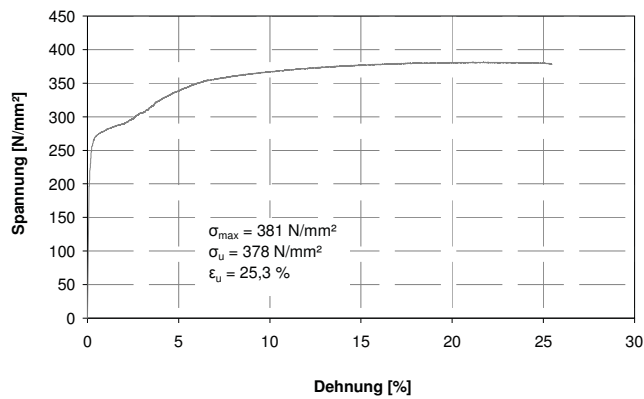
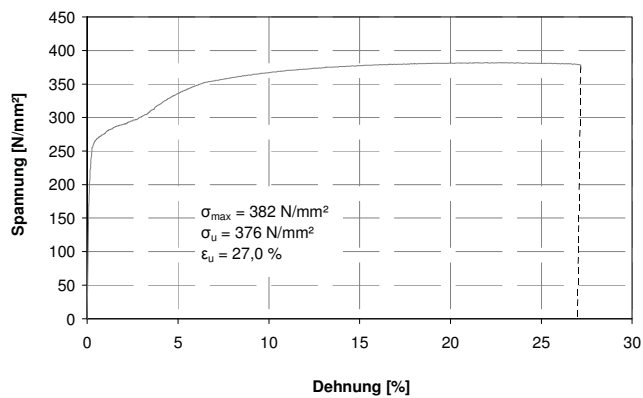
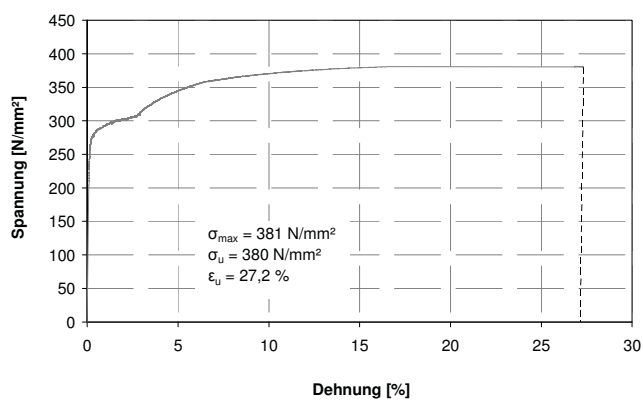
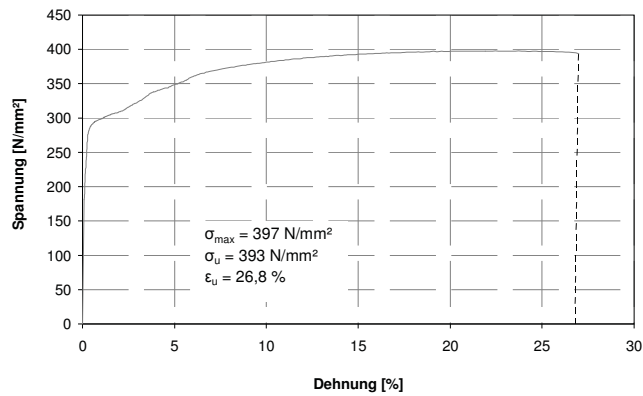
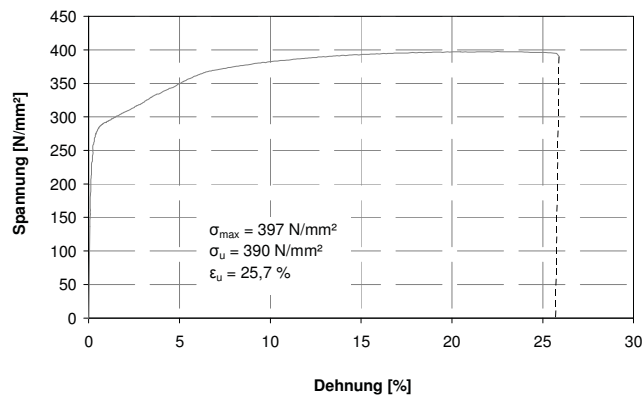
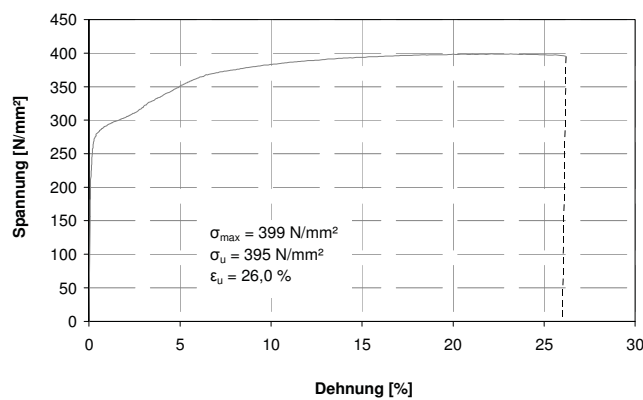


Abbildung A 1.3: Probe 3 – Dehnungszunahmegeschwindigkeit $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$

Abbildung A 1.4: Probe 1 – Dehnungszunahmegeschwindigkeit $7,5 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ Abbildung A 1.5: Probe 2 – Dehnungszunahmegeschwindigkeit $7,5 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ Abbildung A 1.6: Probe 3 – Dehnungszunahmegeschwindigkeit $7,5 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$

Abbildung A 1.7: Probe 1 – Dehnungszunahmegeschwindigkeit $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ Abbildung A 1.8: Probe 2 – Dehnungszunahmegeschwindigkeit $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ Abbildung A 1.9: Probe 3 – Dehnungszunahmegeschwindigkeit $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$

A 2 Ergebnisse der Verbundversuche

Zugkraft über die Versuchszeit für die Probekörper mit Aussparung und Querdraht im Betonsteg

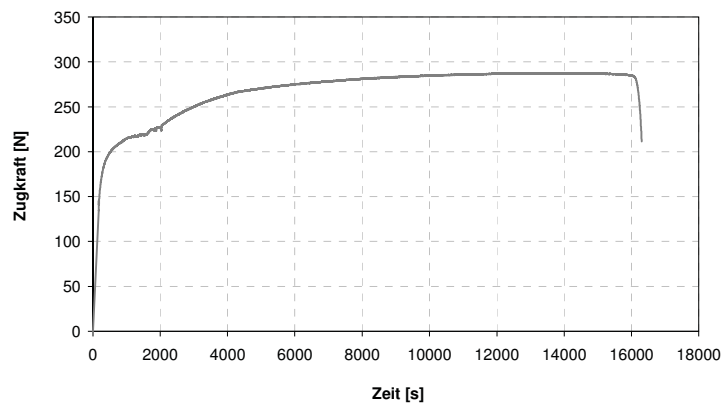


Abbildung A 2.1: Probe P1V_A

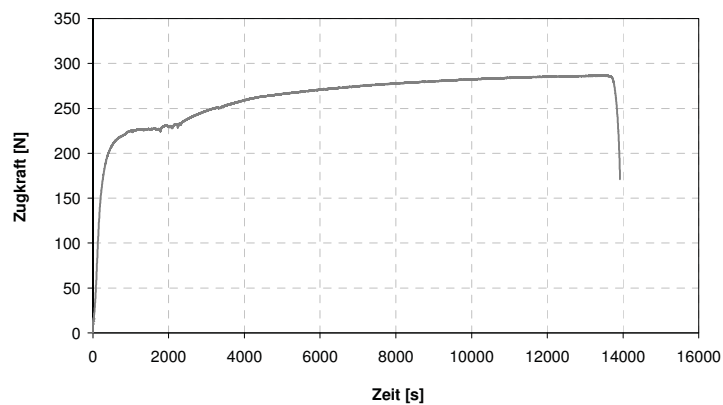


Abbildung A 2.2: Probe P2V_A

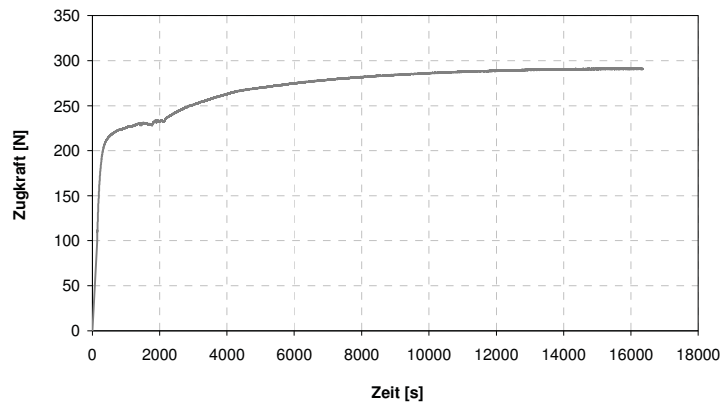


Abbildung A 2.3: Probe P3V_A

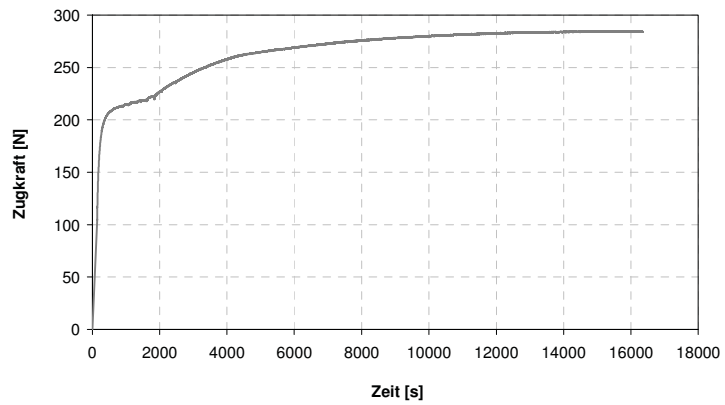


Abbildung A 2.4: Probe P4V_A

A 3 Mechanische Kennwerte des UHPC - Druck

Tabelle A 3.1: Zusammenstellung der Ergebnisse der einaxialen Druckversuche

Art der Probe	Lagerung	Bewehrung	Alter [d]	Bezeichnung	Druckspannung [N/mm ²]	Mittelwert [N/mm ²]	Standardabweichung [N/mm ²]
Zylinder (Ø150, h 300)	Wasser 20 °C	keine	3	Z1	101,4	97,8	4,6
				Z2	98,8		
				Z3	103,0		
				Z4	92,6		
				Z5	93,4		
			7	Z6	122,5	121,0	5,3
				Z7	123,5		
				Z8	118,0		
				Z9	113,6		
				Z10	127,2		
			28	Z16	139,4	144,7	4,4
				Z17	144,4		
				Z18	151,6		
				Z19	143,8		
				Z20	144,4		
Würfel (100er)	Wasser 20 °C	keine	3	W1	98,4	100,2	3,7
				W2	105,6		
				W3	102,3		
				W4	97,4		
				W5	97,1		
			7	W6	121,9	118,0	4,7
				W7	120,3		
				W8	112,3		
				W9	113,5		
				W10	121,7		
			28	W11	148,9	143,2	5,8
				W12	137,6		
				W13	143,8		
				W14	143,6		
				W15	134,2		
				W16	139,2		
				W17	149,8		
				W18	148,5		
Würfel (40er) aus Prismen	Wasser 20 °C	keine	3	P1	104,1	107,0	4,8
				P2	102,6		
				P3	107,4		
				P4	110,9		
				P5	102,7		
				P6	114,2		
			28	P7	152,4	153,9	6,6
				P8	160,3		
				P9	150,3		
				P10	160,4		
				P11	143,3		
				P12	156,5		
Zylinder (Ø150, h 300)	Wärme 90 °C	keine	3	Z1 WB	185,6	179,5	5,3
				Z2 WB	176,8		
				Z3 WB	176,2		
			7	Z4 WB	193,0 *	> 193,0 *	*
				Z5 WB	193,0 *		
				Z6 WB	193,0 *		
			28	Z7 WB	193,0 *	> 193,0 *	*
				Z8 WB	193,0 *		
				Z9 WB	193,0 *		
Zylinder (Ø150, h 300)	Wasser 20 °C	Fasern	3	Z1 F	135,7	136,2	1,0
				Z2 F	135,5		
				Z3 F	137,3		
			7	Z4 F	164,8	158,9	5,2
				Z5 F	157,0		
				Z6 F	154,9		
			28	Z7 F	178,2	181,3	5,4
				Z8 F	187,5		
				Z9 F	178,1		
Zylinder (Ø150, h 300)	Wärme 90 °C	Fasern	3	Z1 F WB	179,5	185,5	5,8
				Z2 F WB	185,9		
				Z3 F WB	191,0		
			7	Z4 F WB	193,0 *	> 193,0 *	*
				Z5 F WB	193,0 *		
				Z6 F WB	193,0 *		
			28	Z7 F WB	193,0 *	> 193,0 *	*
				Z8 F WB	193,0 *		
				Z9 F WB	193,0 *		

* maschinentechnisch bedingt war eine Steigerung über 3400 kN ($\approx 193 \text{ N/mm}^2$) nicht möglich, daher sind die entsprechenden Mittelwerte als Mindestwerte zu betrachten, eine Standardabweichung existiert dann nicht

Zylinder (Ø150, h 300)	Wasser 20 °C	Mikro- bewehrung	3	Z1 MB	131,8	138,9	6,6
				Z2 MB	140,1		
				Z3 MB	144,7		
			7	Z4 MB	163,1	162,6	1,6
				Z5 MB	163,9		
				Z6 MB	160,8		
			28	Z7 MB	190,1	> 192,0 *	~ 1,6 *
				Z8 MB	193,0 *		
				Z9 MB	192,7		
Zylinder (Ø150, h 300)	Wärme 90 °C	Mikro- bewehrung	28	Z1 MB WB	193,0 *	> 193,0 *	*
				Z2 MB WB	193,0 *		
				Z3 MB WB	193,0 *		

* maschinentechnisch bedingt war eine Steigerung über 3400 kN ($\approx 193 \text{ N/mm}^2$) nicht möglich, daher sind die entsprechenden Mittelwerte als Mindestwerte zu betrachten, eine Standardabweichung existiert dann nicht

Tabelle A 3.2: Zusammenstellung der Ergebnisse der E-Modul-Versuche

Art der Probe	Lagerung	Bewehrung	Alter [d]	Bezeichnung	E-Modul [N/mm²]	Mittelwert [N/mm²]	Standardabweichung [N/mm²]
Zylinder (Ø150, h 300)	Wasser 20 °C	keine	28	Z21	48213	48867	441
				Z22	49165		
				Z23	49300		
				Z24	48639		
				Z25	49016		
Zylinder (Ø150, h 300)	Wärme 90 °C	keine	28	Z10 WB	52448	52602	152
				Z11 WB	52607		
				Z12 WB	52751		
Zylinder (Ø150, h 300)	Wasser 20 °C	Fasern	28	Z10 F	55895	56407	1317
				Z11 F	55424		
				Z12 F	57903		
Zylinder (Ø150, h 300)	Wasser 20 °C	Mikro- bewehrung	28	Z10 MB	55109	54944	162
				Z11 MB	54938		
				Z12 MB	54785		

A 4 Mechanische Kennwerte des UHPC – Zugfestigkeit

Spannungs-Dehnungs-Beziehungen

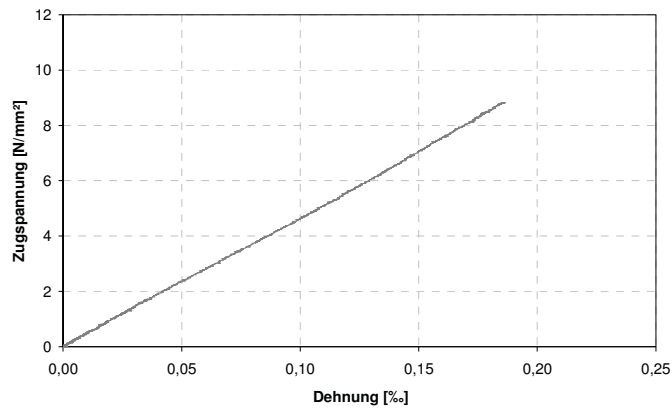


Abbildung A 4.1: Probe P1Z – Spannungs-Dehnungs-Beziehung

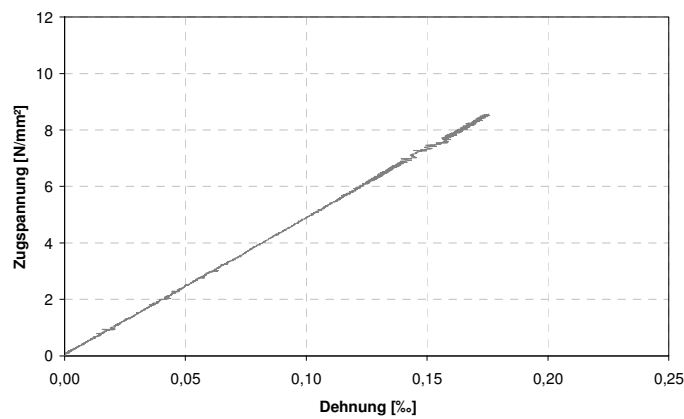


Abbildung A 4.2: Probe P2Z – Spannungs-Dehnungs-Beziehung

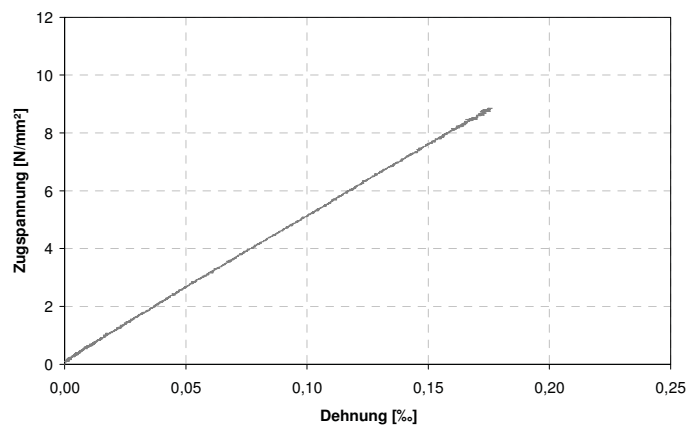


Abbildung A 4.3: Probe P3Z – Spannungs-Dehnungs-Beziehung

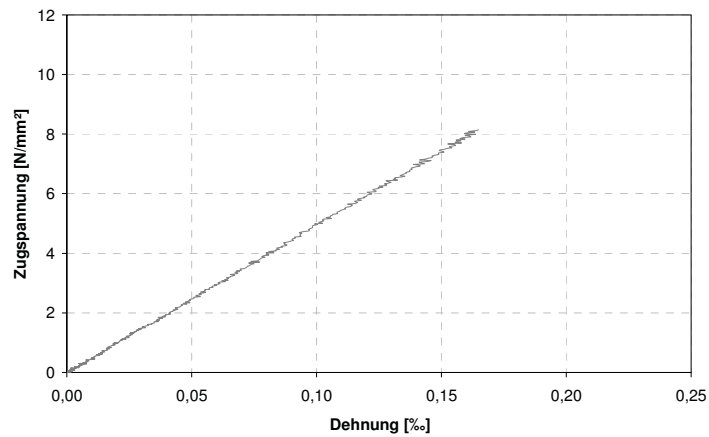


Abbildung A 4.4: Probe P4Z – Spannungs-Dehnungs-Beziehung

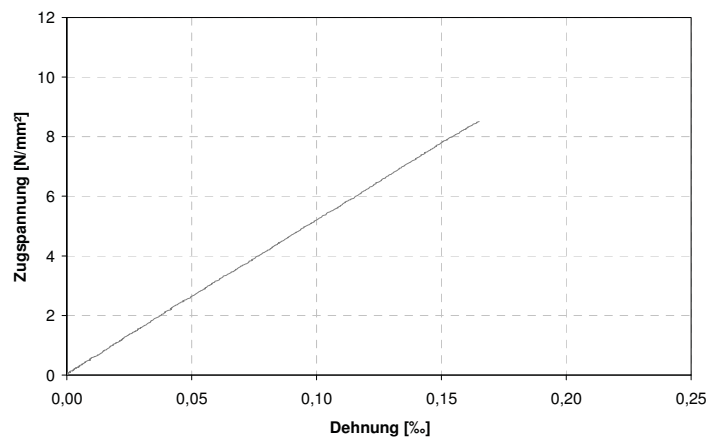


Abbildung A 4.5: Probe P5Z – Spannungs-Dehnungs-Beziehung

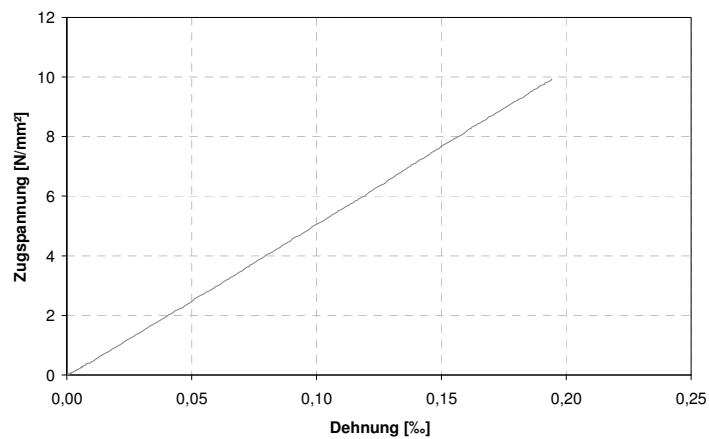


Abbildung A 4.6: Probe P6Z – Spannungs-Dehnungs-Beziehung

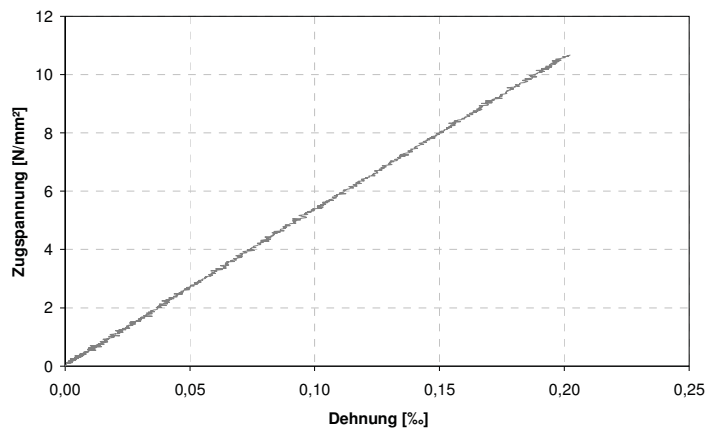


Abbildung A 4.7: Probe P1Z_F – Spannungs-Dehnungs-Beziehung

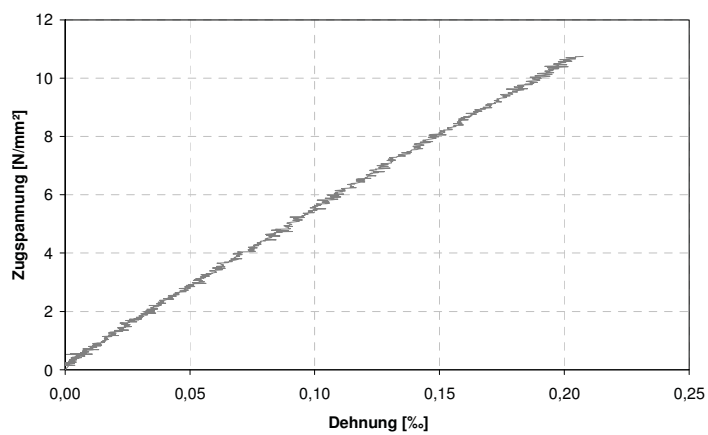


Abbildung A 4.8: Probe P2Z_F – Spannungs-Dehnungs-Beziehung

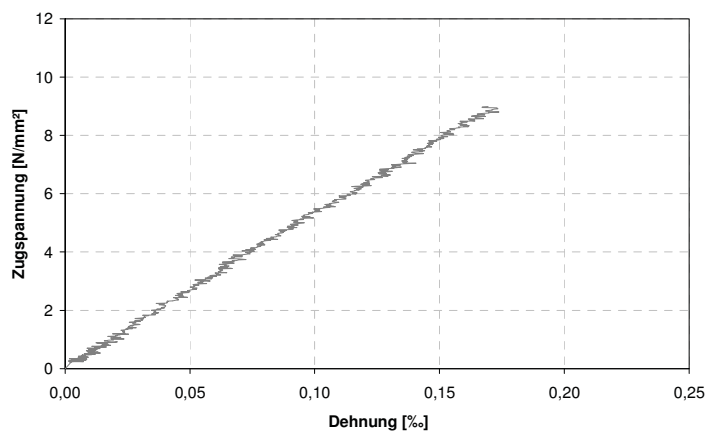


Abbildung A 4.9: Probe P3Z_F – Spannungs-Dehnungs-Beziehung

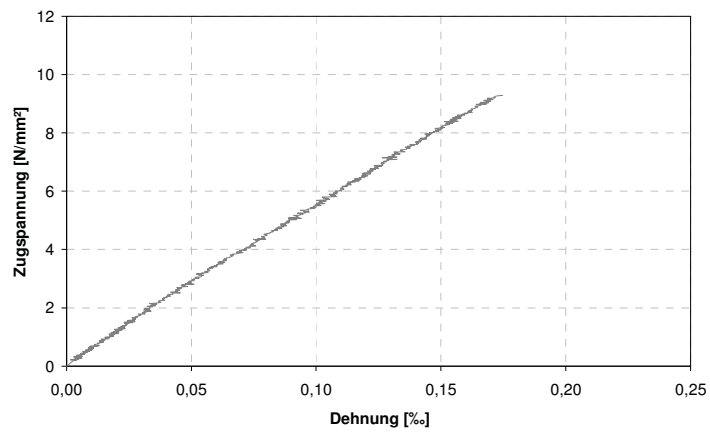


Abbildung A 4.10: Probe P4Z_F– Spannungs-Dehnungs-Beziehung

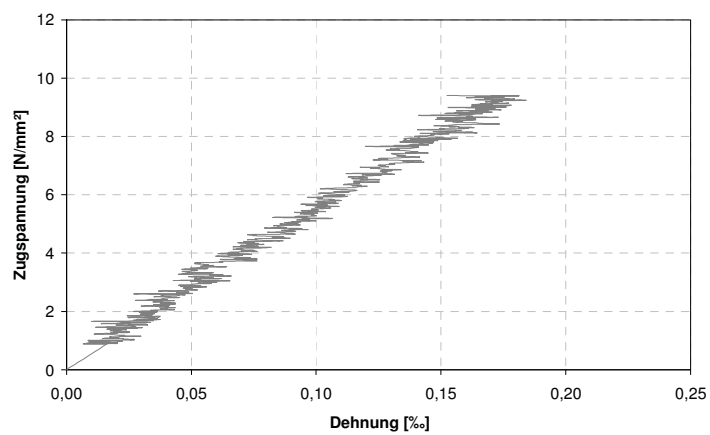


Abbildung A 4.11: Probe P5Z_F– Spannungs-Dehnungs-Beziehung

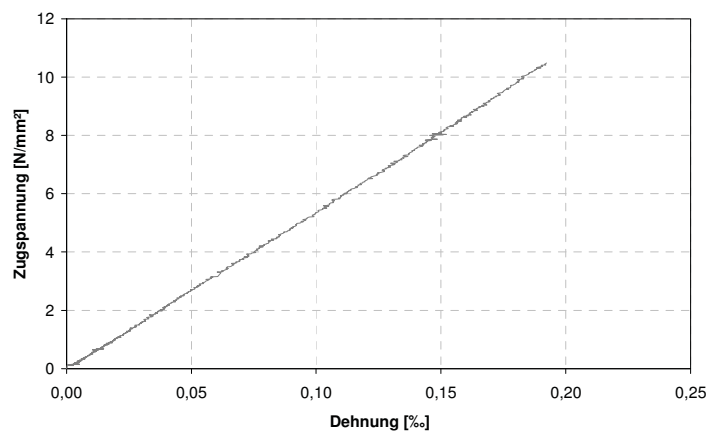


Abbildung A 4.12: Probe P6Z_F– Spannungs-Dehnungs-Beziehung

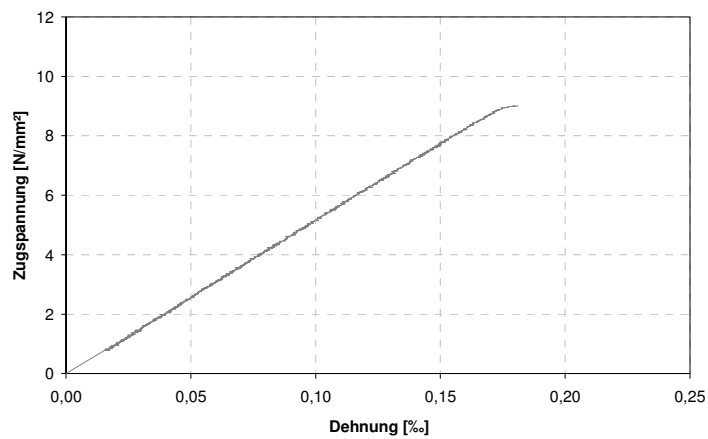


Abbildung A 4.13: Probe P1Z_MB– Spannungs-Dehnungs-Beziehung

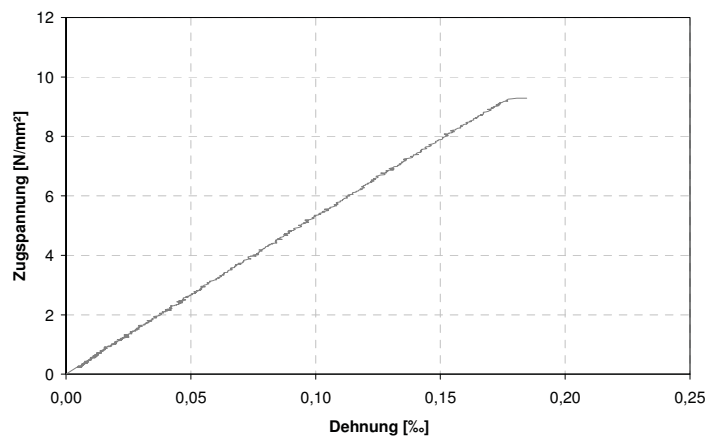


Abbildung A 4.14: Probe P2Z_MB– Spannungs-Dehnungs-Beziehung

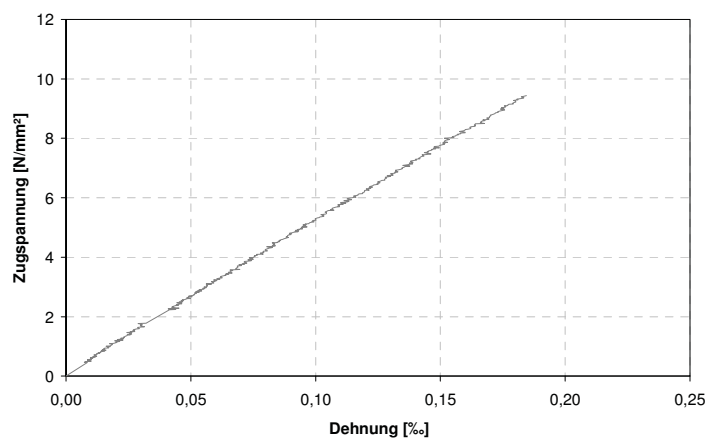


Abbildung A 4.15: Probe P3Z_MB– Spannungs-Dehnungs-Beziehung

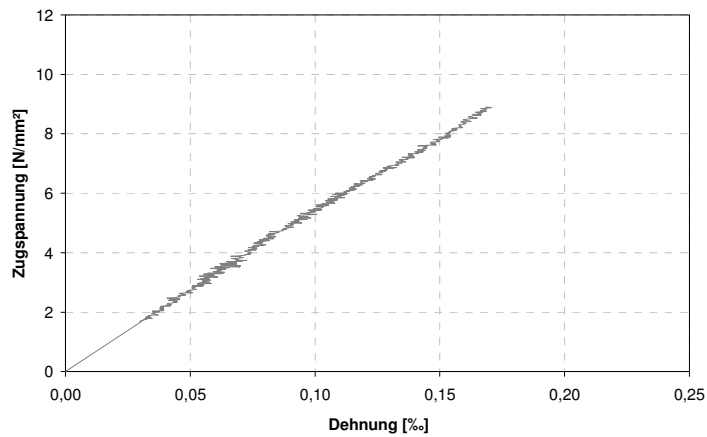


Abbildung A 4.16: Probe P4Z_MB– Spannungs-Dehnungs-Beziehung

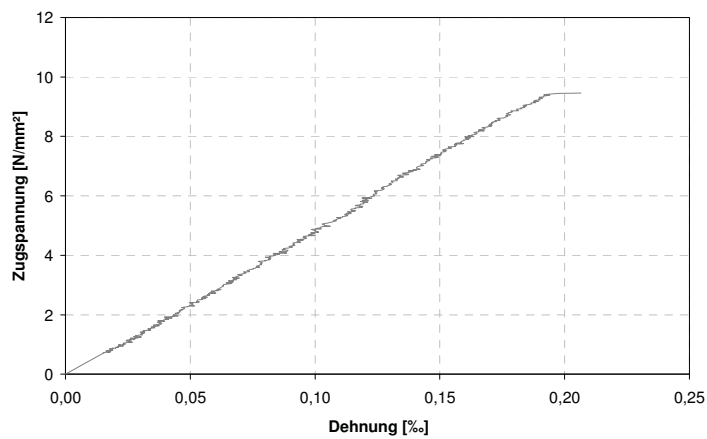


Abbildung A 4.17: Probe P5Z_MB– Spannungs-Dehnungs-Beziehung

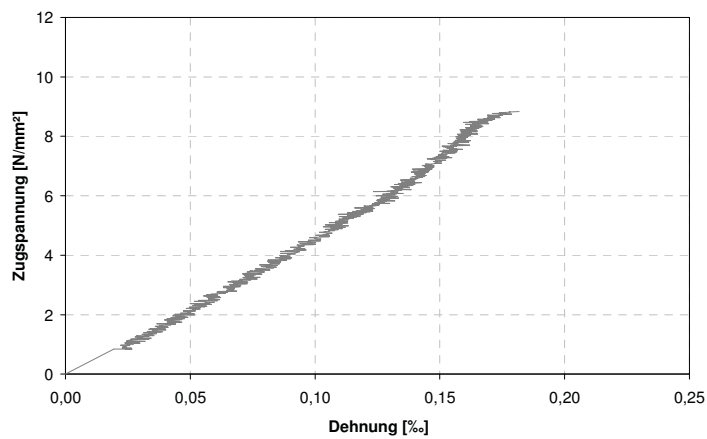


Abbildung A 4.18: Probe P6Z_MB– Spannungs-Dehnungs-Beziehung

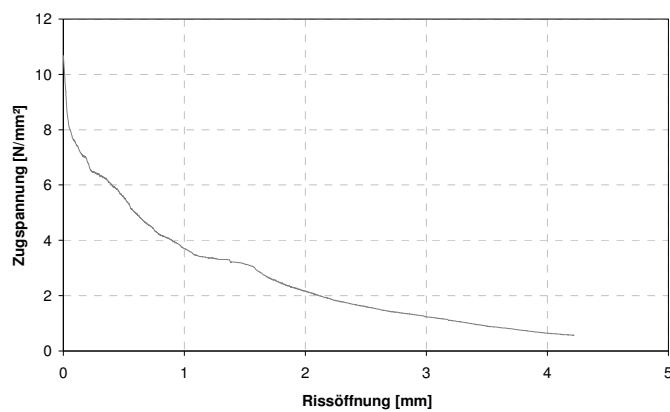
Spannungs-Rissöffnungs-Beziehungen

Abbildung A 4.19: Probe P1Z_F – Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung

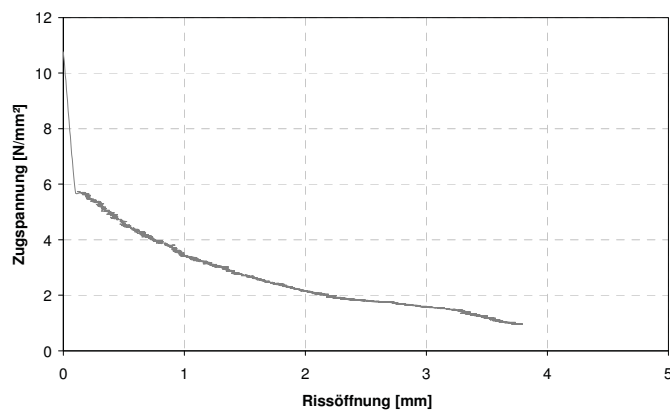


Abbildung A 4.20: Probe P2Z_F – Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung

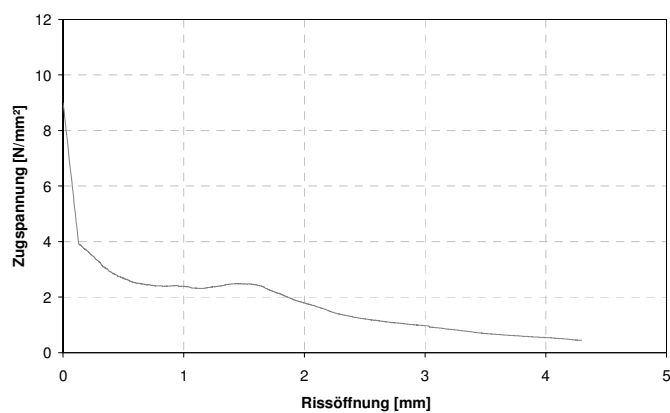


Abbildung A 4.21: Probe P3Z_F – Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung

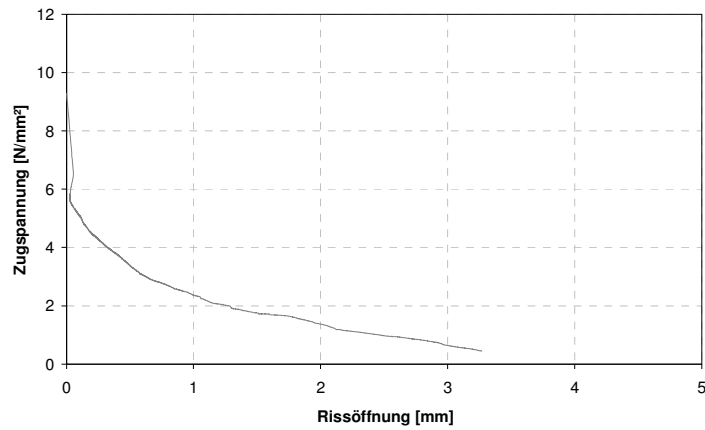


Abbildung A 4.22: Probe P4Z_F – Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung

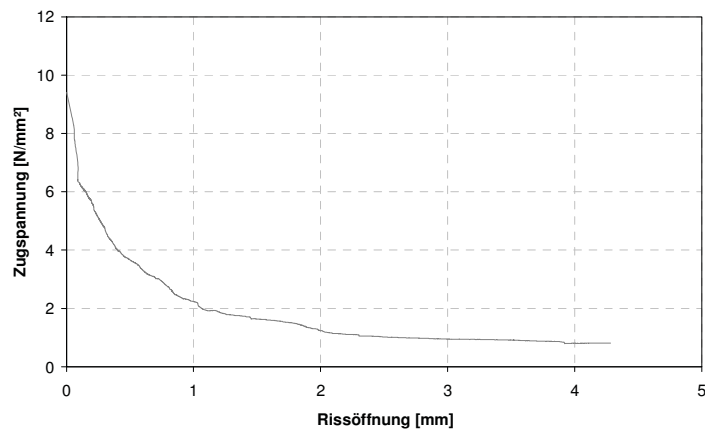


Abbildung A 4.23: Probe P5Z_F – Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung

(Bruch außerhalb des Messbereichs der Probe P6Z_F)

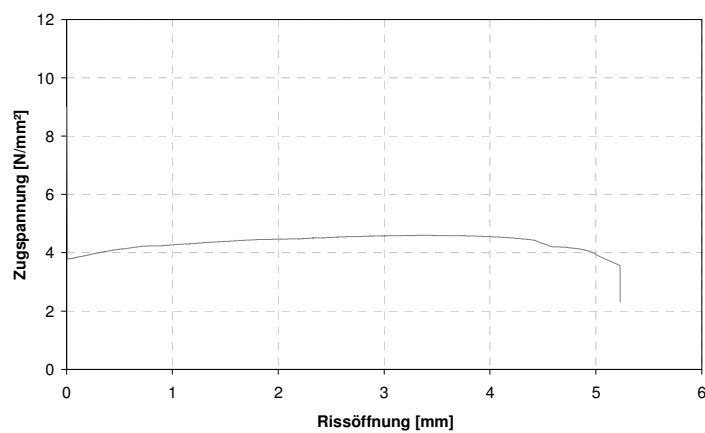


Abbildung A 4.24: Probe P1Z_MB – Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung

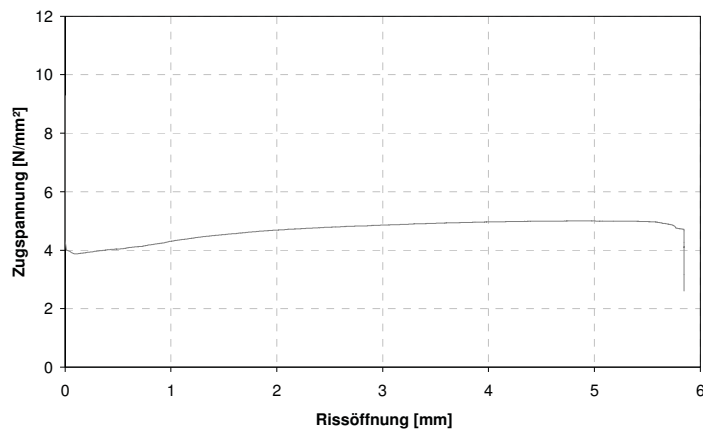


Abbildung A 4.25: Probe P2Z_MB – Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung

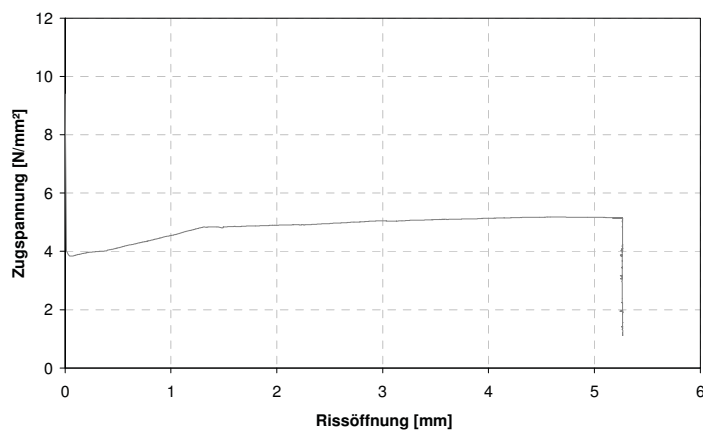


Abbildung A 4.26: Probe P3Z_MB – Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung

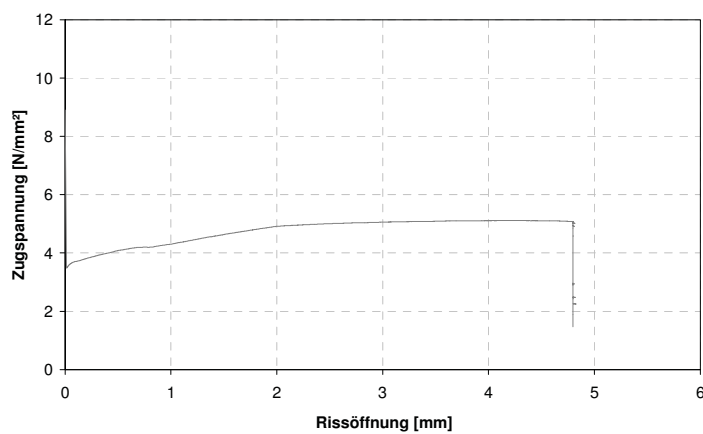


Abbildung A 4.27: Probe P4Z_MB – Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung

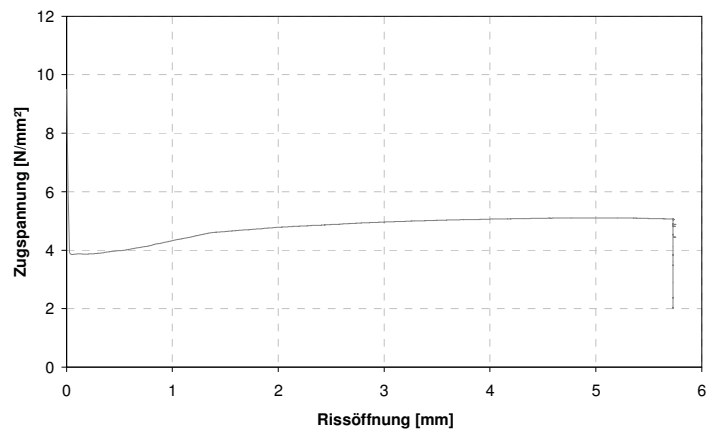


Abbildung A 4.28: Probe P5Z_MB – Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung

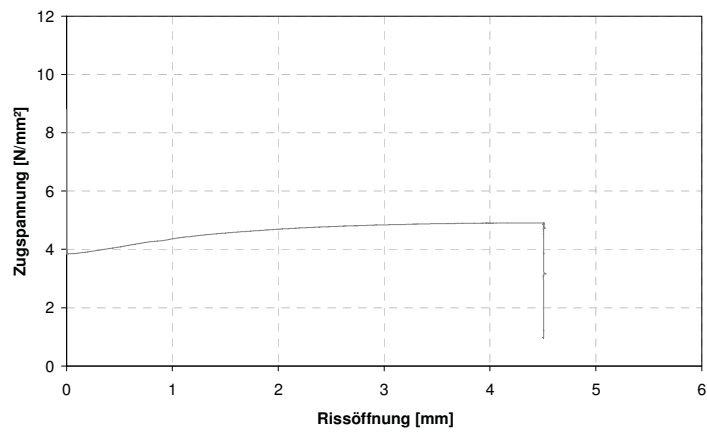


Abbildung A 4.29: Probe P6Z_MB – Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung

Tabelle A 4.1: Zusammenstellung der Ergebnisse der Zugversuche

Bezeichnung	Erstriss				
	Zugspannung [N/mm ²]			mittlere Dehnung bei Erstriss [‰]	mittlerer E-Modul [N/mm ²]
	Einzelwert	Mittelwert	Standard- abweichung		
P1Z	8,8	8,8	0,6	0,19	46951
P2Z	8,6			0,18	48594
P3Z	8,9			0,18	49772
P4Z	8,1			0,16	49600
P5Z	8,5			0,17	51494
P6Z	10,0			0,19	51364
P1Z_F	10,7	9,9	0,8	0,20	52997
P2Z_F	10,8			0,21	52147
P3Z_F	9,0			0,17	52126
P4Z_F	9,3			0,17	53613
P5Z_F	9,4			0,18	52266
P6Z_F	10,5			0,19	54347
P1Z_MB	9,0	9,2	0,3	0,18	51676
P2Z_MB	9,3			0,18	52546
P3Z_MB	9,4			0,19	50819
P4Z_MB	8,9			0,17	51091
P5Z_MB	9,5			0,20	50080
P6Z_MB	8,8			0,18	51919

A 5 Ergebnisse der Biegezugversuche

Unbewehrte Proben: Maschinenkraft über die Randdehnung (Ober- und Unterseite)

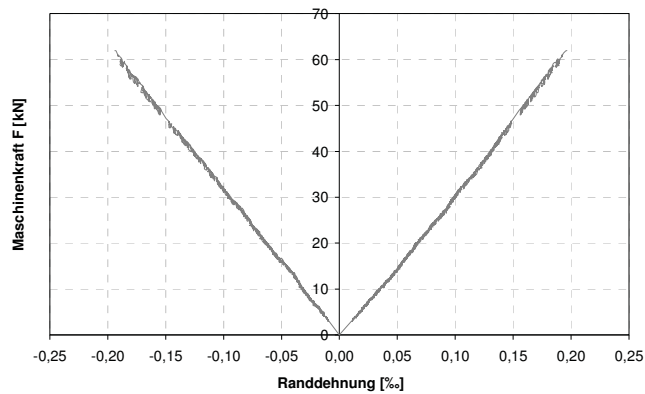


Abbildung A 5.1: P1B_D

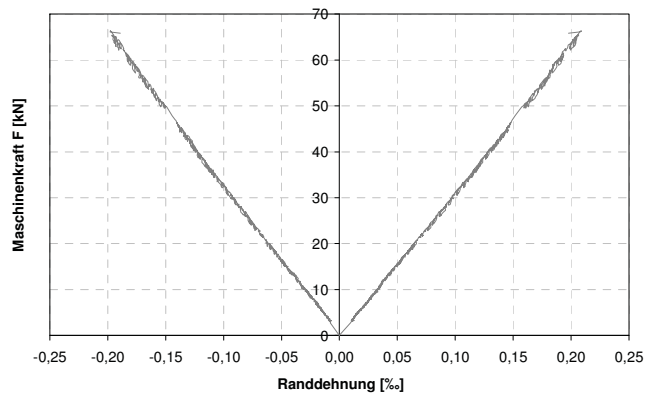


Abbildung A 5.2: P2B_D

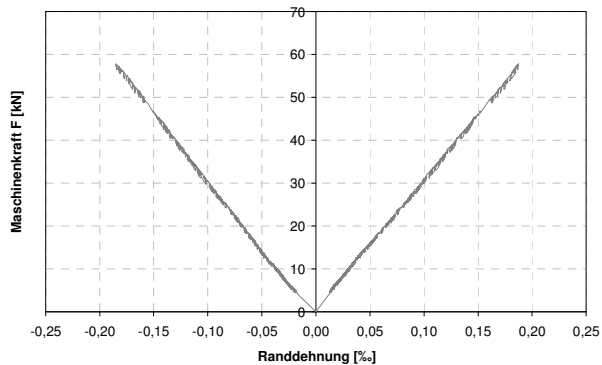


Abbildung A 5.3: P3B_D

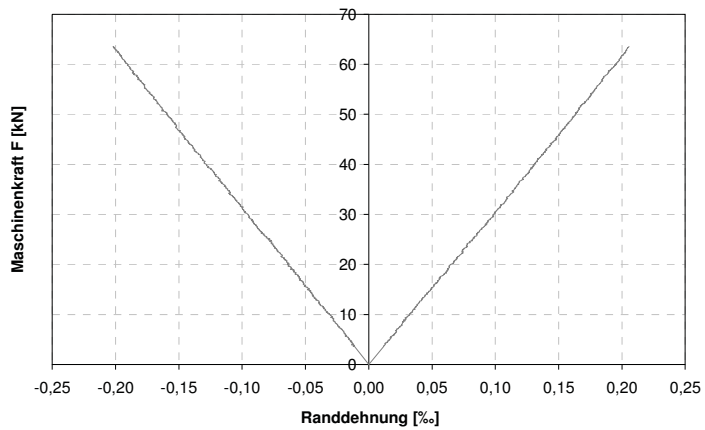


Abbildung A 5.4: P4B_D

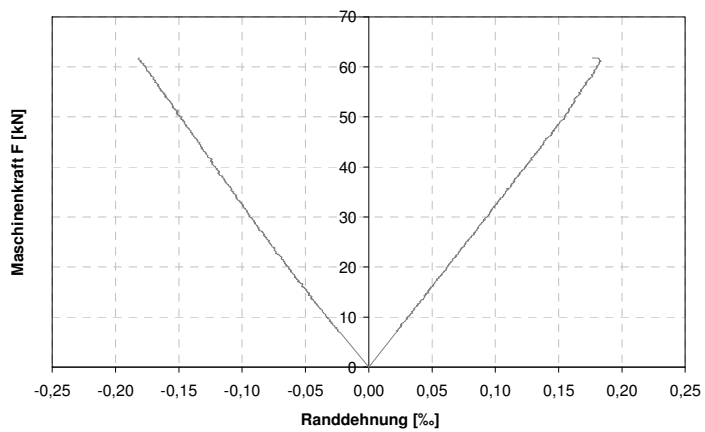


Abbildung A 5.5: P5B_D

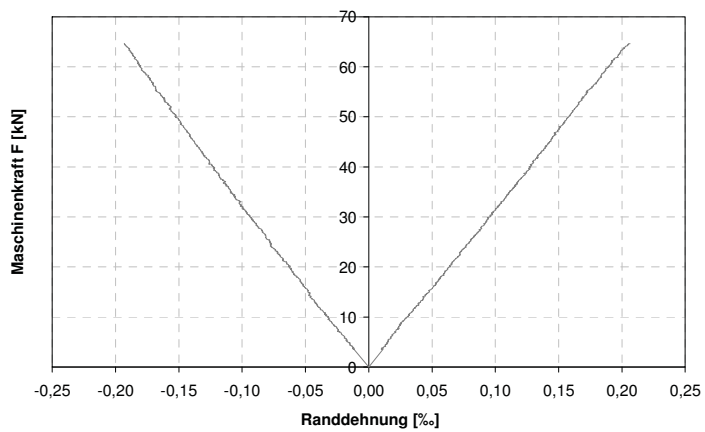


Abbildung A 5.6: P6B_D

Tabelle A 5.1: Übersicht der Biegeversuche an Prismen

Art der Probe	Lagerung	Bewehrung	Alter [d]	Bezeichnung	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]		Druckfestigkeit [N/mm ²]	
					Einzelwerte	Mittelwert	Einzelwerte	Mittelwert
Prisma (40 x 40 x 160)	Wasser 20 °C	keine	28	P1P	20,06	21,9	144,0	148,8
							147,5	
				P2P	22,44		149,1	
							151,3	
				P3P	23,3		149,7	
							151,2	

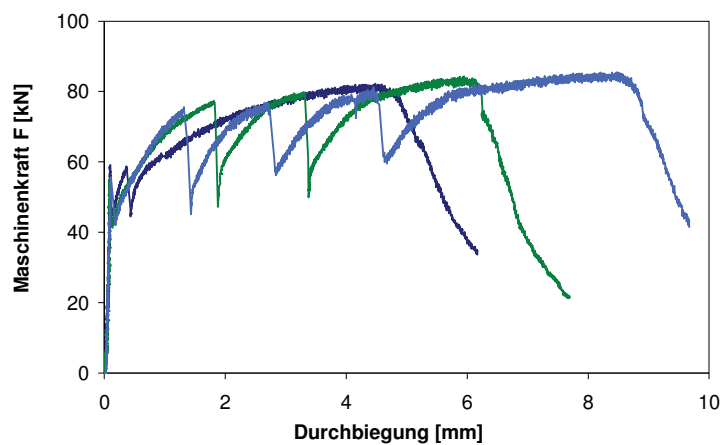
Mikrobewehrte Proben: Maschinenkraft über die Durchbiegung**a) Mikrobewehrung vertikal (parallel zur Kraft), ~2,5 Vol.-% Stahl**

Abbildung A 5.7: MB1-2,6-1-v bis 3-v

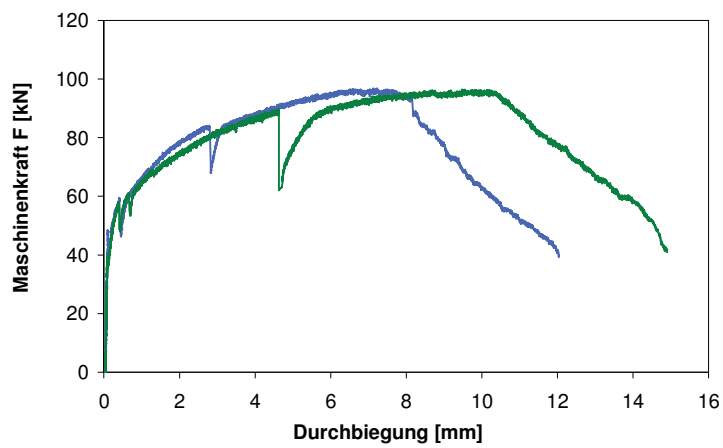


Abbildung A 5.8: MB3-3,0-4-v und 6-v

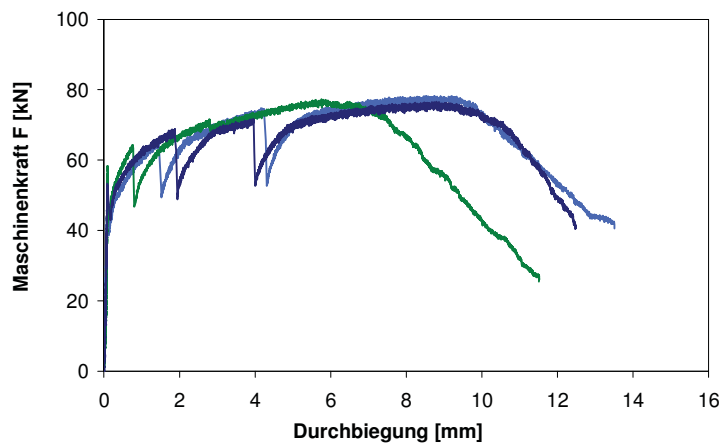


Abbildung A 5.9: MB4-2,4-7-v bis 9-v

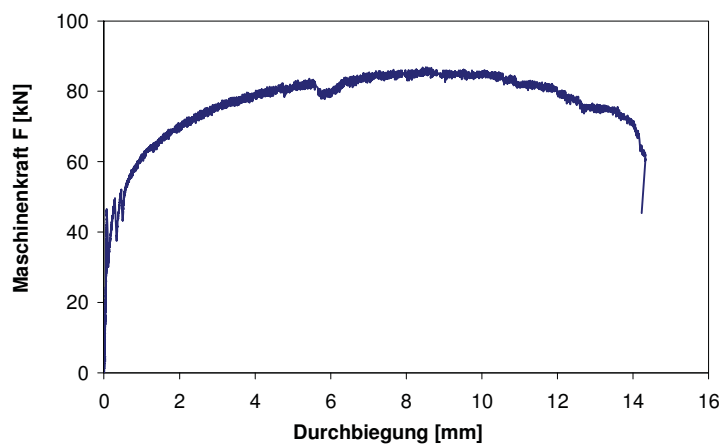


Abbildung A 5.10 MB5-2,7-11-v

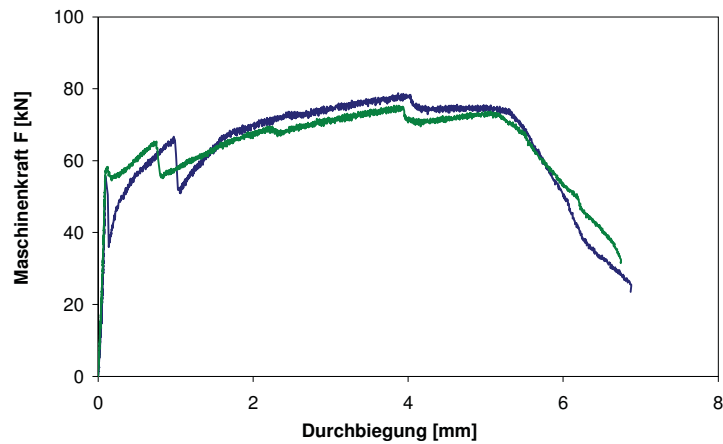
b) Mikrobewehrung horizontal (senkrecht zur Kraft), ~2,5 Vol.-% Stahl

Abbildung A 5.11: MB1-2,6-2-h und 3-h

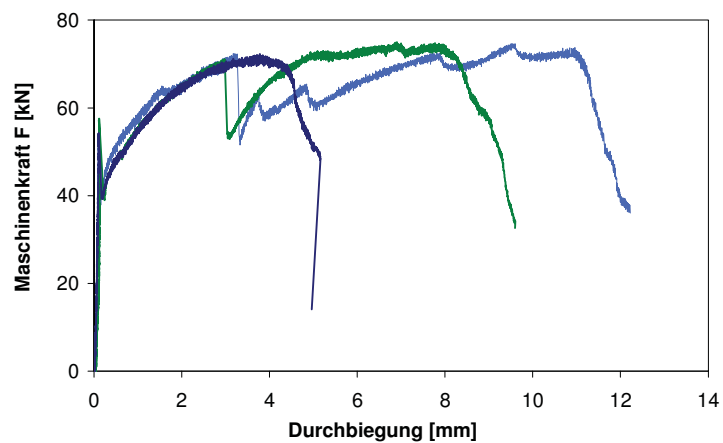


Abbildung A 5.12: MB3-2,5-4-h bis 6-h

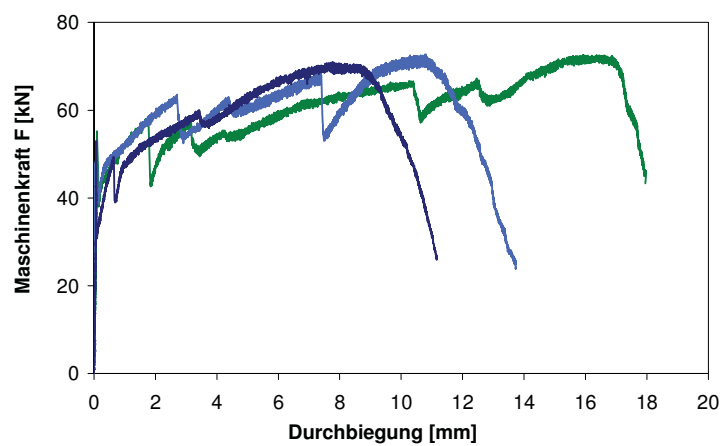


Abbildung A 5.13: MB4-2,4-7-h bis 9-h

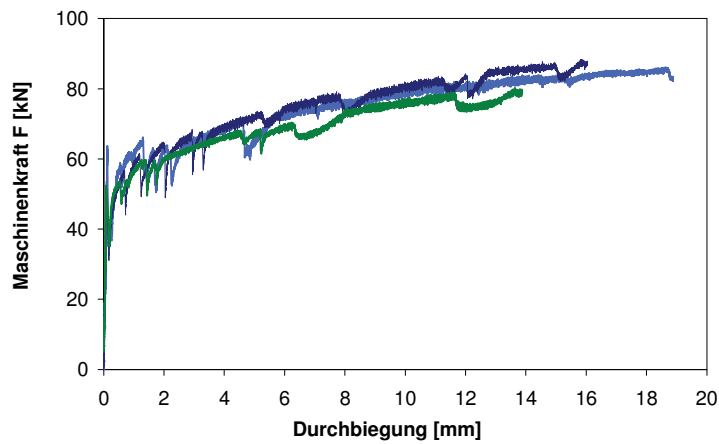


Abbildung A 5.14: MB5-2,7-10-h bis 12-h

c) Mikrobewehrung vertikal (parallel zur Kraft), ~5,0 Vol.-% Stahl

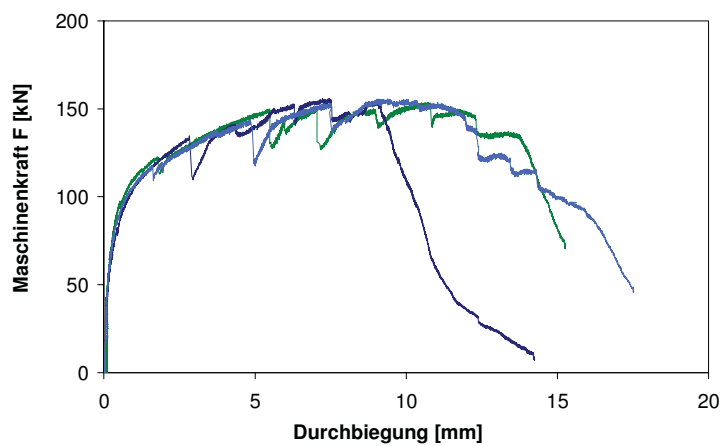


Abbildung A 5.15: MB1-5,1-51-v bis 53-v

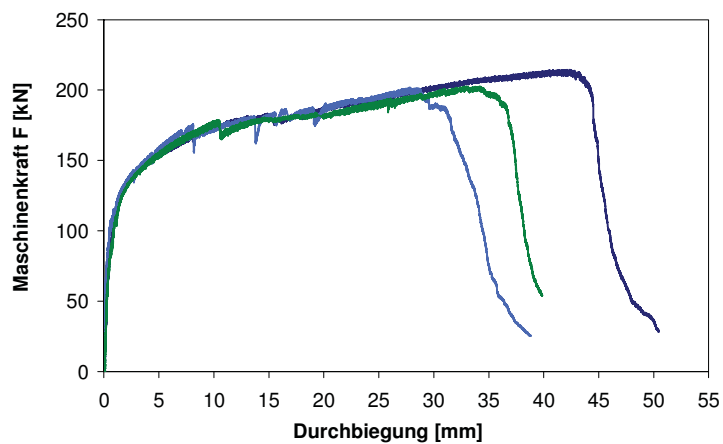


Abbildung A 5.16: MB3-6,1-54-v bis 56-v

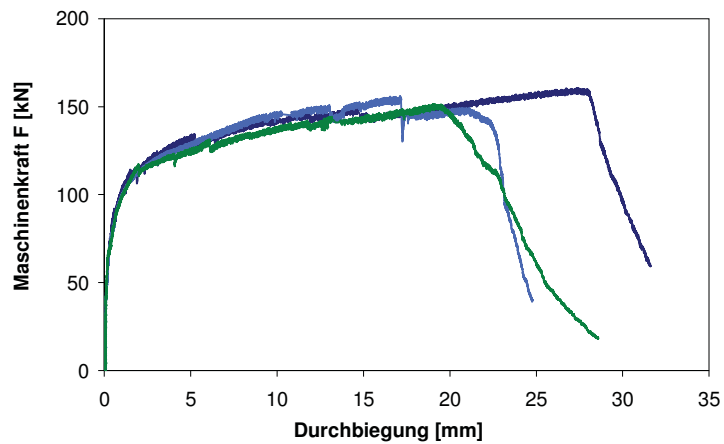


Abbildung A 5.17: MB4-4,7-57-v bis 59-v

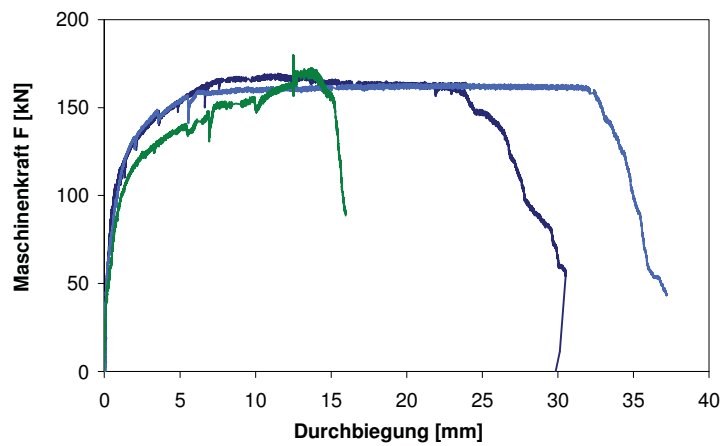


Abbildung A 5.18: MB5-5,4-60-v bis 62-v

d) Mikrobewehrung horizontal (senkrecht zur Kraft), ~5,0 Vol.-% Stahl

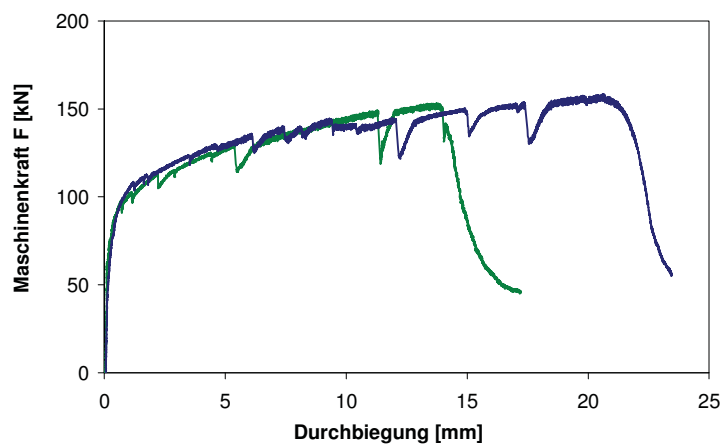


Abbildung A 5.19: MB1-5,1-51-h und 52-h

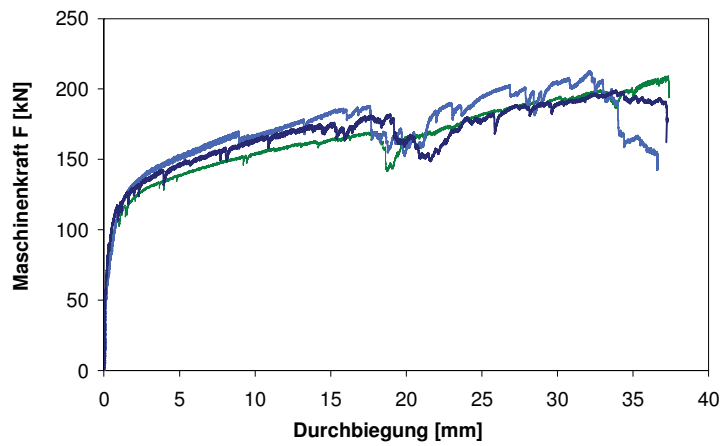


Abbildung A 5.20: MB3-6,1-54-h bis 56-h

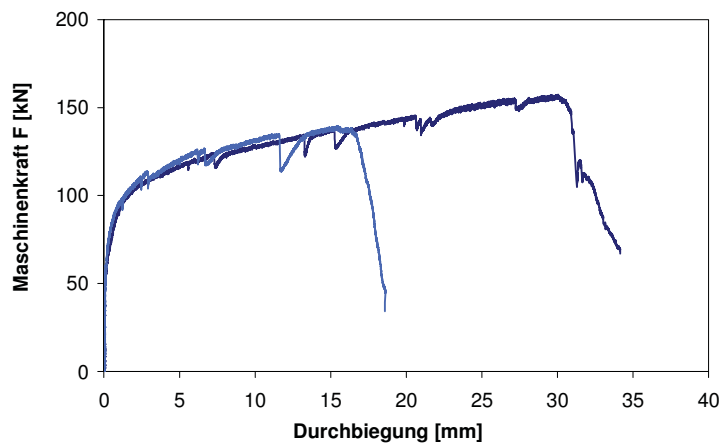


Abbildung A 5.21: MB4-4,7-58-h und 59-h

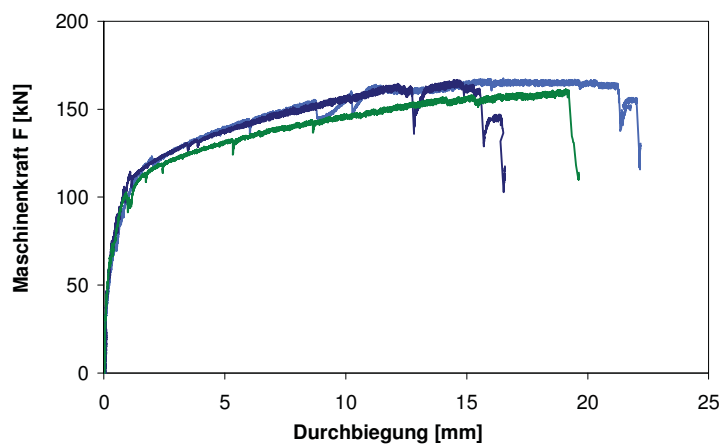


Abbildung A 5.22: MB5-5,4-60-h bis 62-h

Duktilitätsuntersuchungen (grau: Probekörpermitte (l_{03}), schwarz: Probekörperperrand unten, Mittelwert (l_{01} und l_{02}))

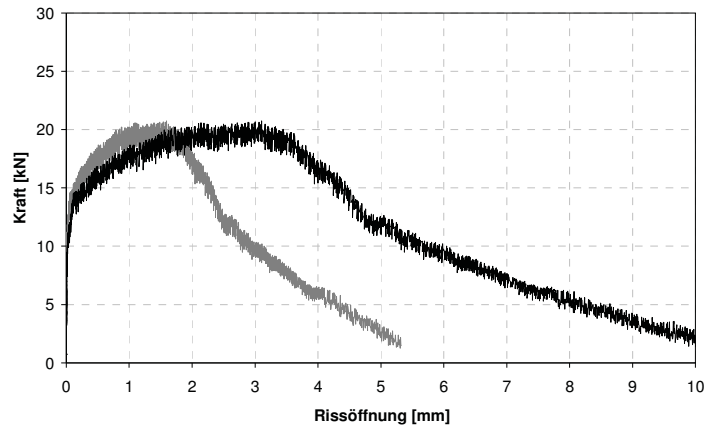


Abbildung A 5.23: H13A, gekerbt

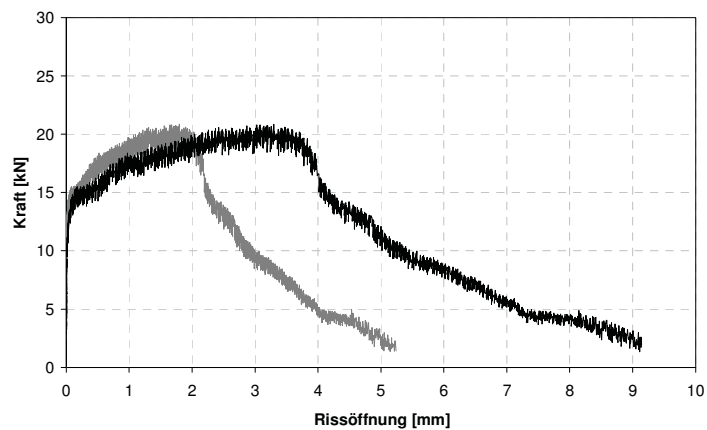


Abbildung A 5.24: H13B, gekerbt

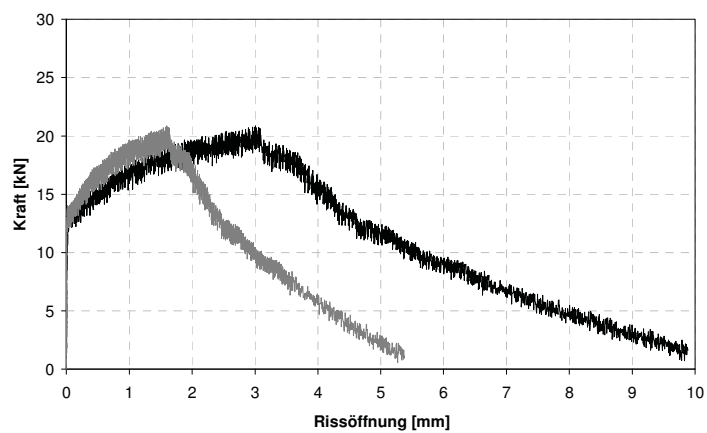


Abbildung A 5.25: H14A, gekerbt

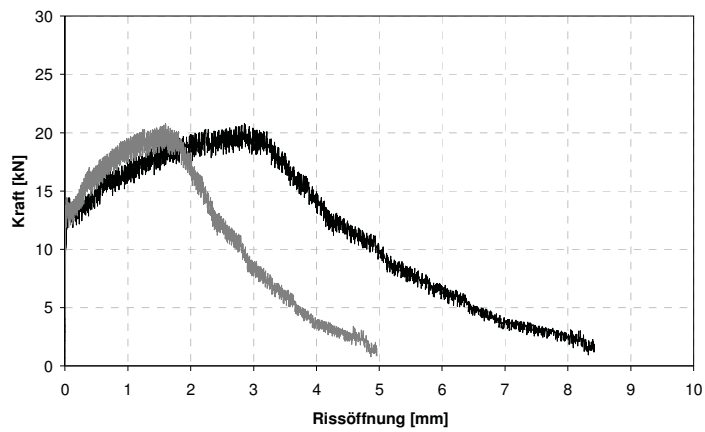


Abbildung A 5.26: H14B, gekerbt

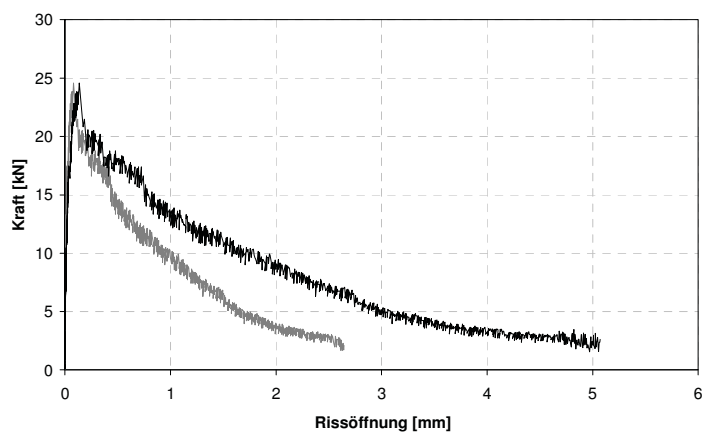


Abbildung A 5.27: H1F3A, gekerbt

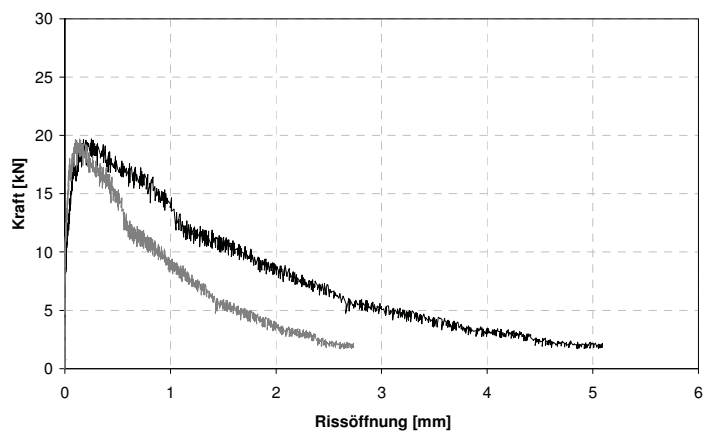


Abbildung A 5.28: H1F3B, gekerbt

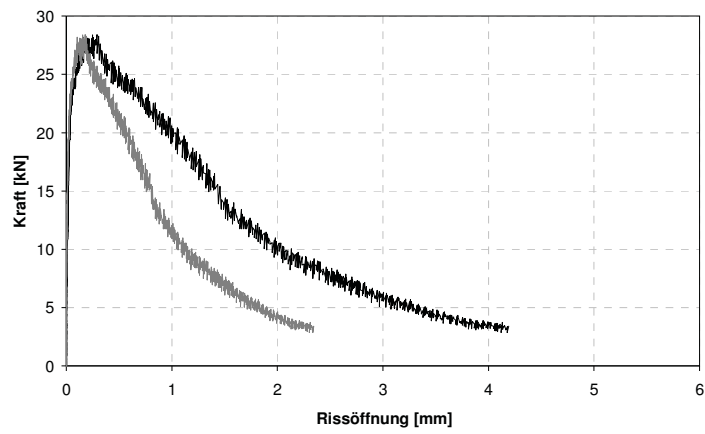


Abbildung A 5.29: H1F6A, gekerbt

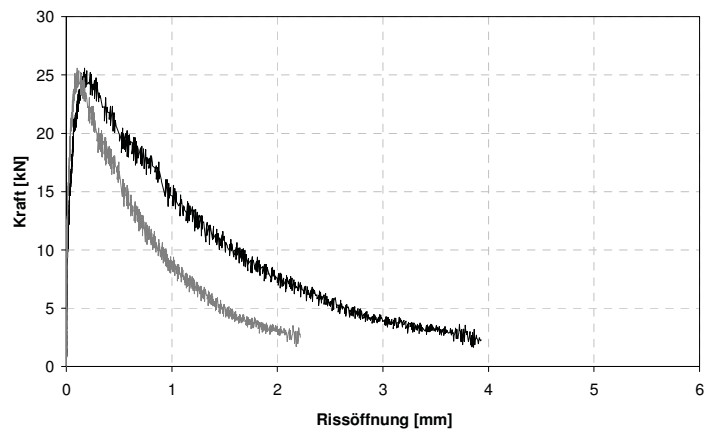


Abbildung A 5.30: H1F6B, gekerbt

A 6 Ergebnisse der CDF-Tests

Feuchteaufnahme

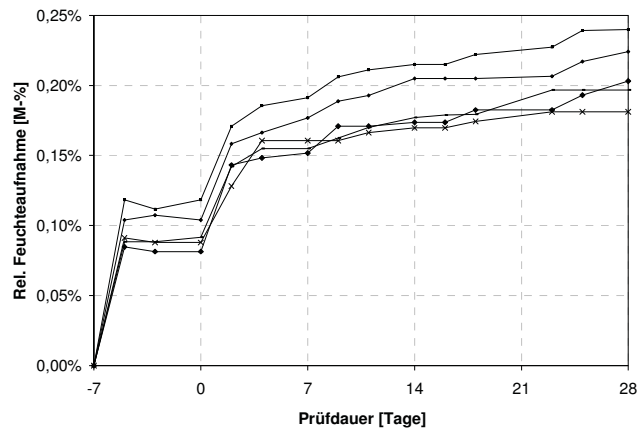


Abbildung A 6.1: Feuchteaufnahme Serie CDF-0

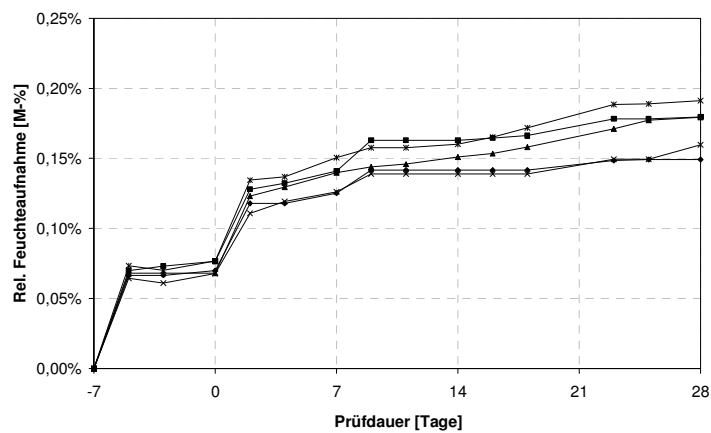


Abbildung A 6.2: Feuchteaufnahme Serie CDF-1

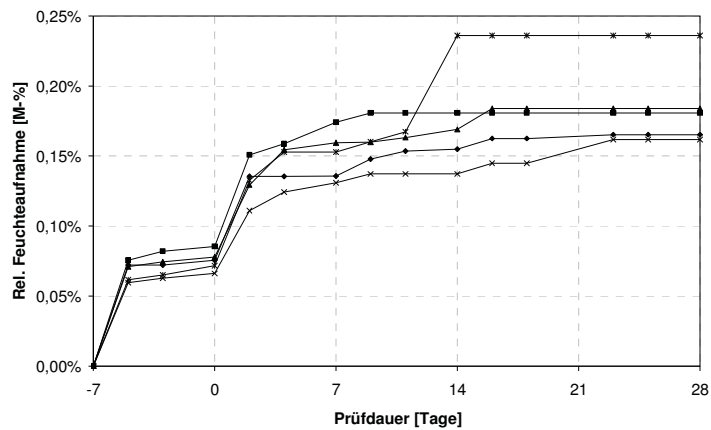


Abbildung A 6.3: Feuchtaufnahme Serie CDF-2

Abwitterung

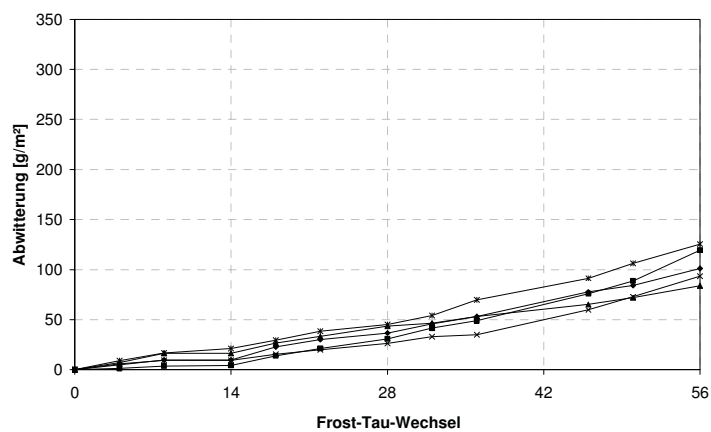


Abbildung A 6.4: Abwitterung Serie CDF-0

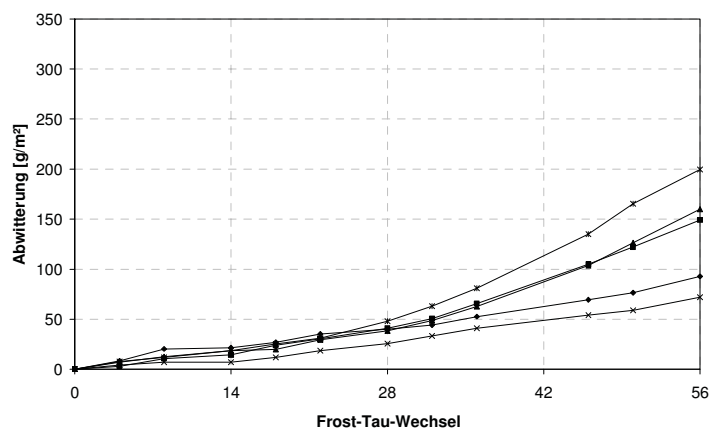


Abbildung A 6.5: Abwitterung Serie CDF-1

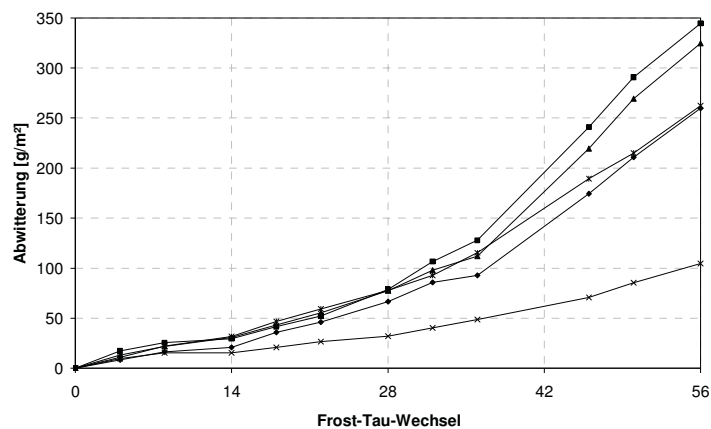


Abbildung A 6.6: Abwitterung Serie CDF-2

Innere Schädigung

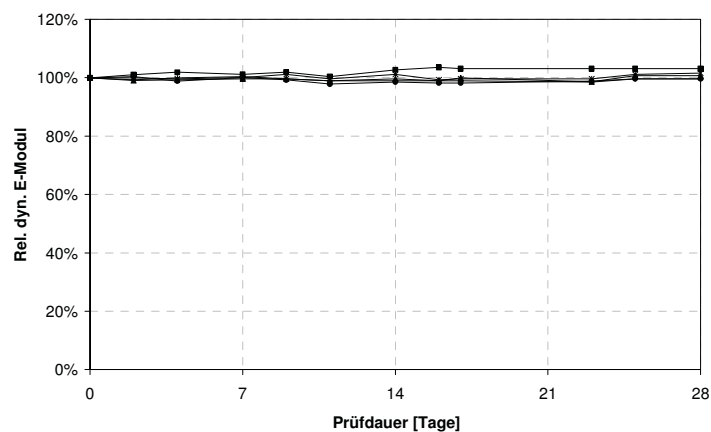


Abbildung A 6.7: Innere Schädigung Serie CDF-0

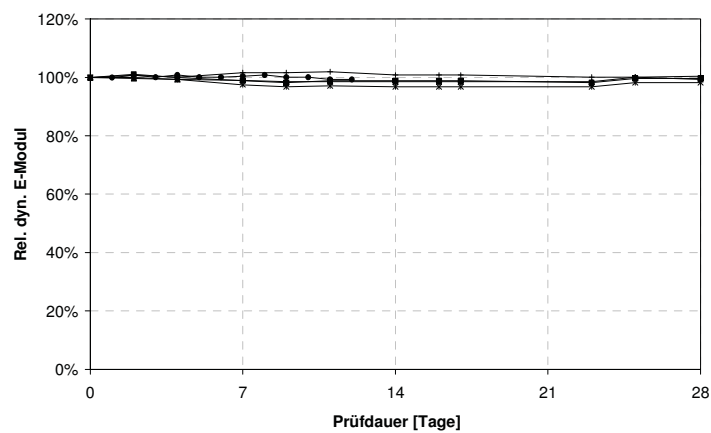


Abbildung A 6.8: Innere Schädigung Serie CDF-1

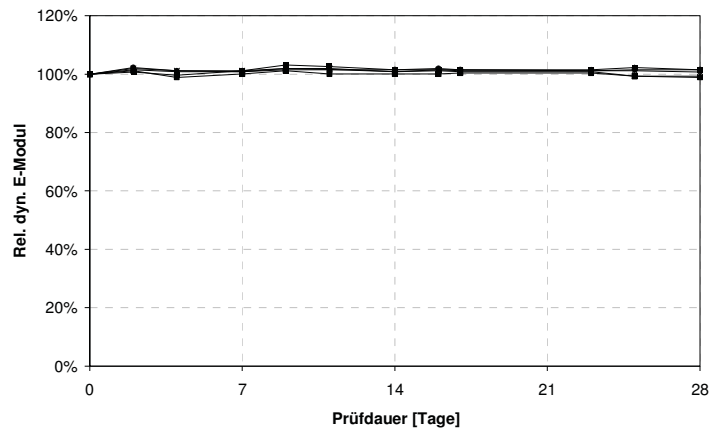


Abbildung A 6.9: Innere Schädigung Serie CDF-2

Anhang B

Analytische und numerische Zusammenhänge

B1 Herleitung der Spannungs-Rissöffnungsbeziehung $\sigma_{\text{comp}}(w)$ für den Verbundquerschnitt

Für den linear elastischen Bereich bis zum Erreichen von $\sigma_{\text{comp,max}}$ gilt die Spannungs-dehnungs-Linie mit ideellen Querschnittswerten:

$$\varepsilon_{\text{UHPC}} = \varepsilon_{\text{MB}}$$

$$\varepsilon_{\text{MB}} = \varepsilon_{\text{UHPC}} = \frac{\sigma_{\text{UHPC,max}}}{E_{\text{UHPC}}}$$

$$\sigma_{\text{comp}} = \sigma_{\text{UHPC}} \cdot (1 + \eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}} \cdot (\alpha - 1))$$

Die Dehnung bis zur Rissöffnung $w_{\text{UHPC,max}}$ ergibt sich aus

$$\varepsilon_{\text{MB}}(w_{\text{UHPC,max}}) = \frac{\sigma_{\text{UHPC,max}}}{E_{\text{UHPC}}} + \frac{w_{\text{UHPC,max}}}{2 \cdot I_{\text{MW}}}$$

mit

$$\sigma_{\text{comp}}(w = 0) \approx \sigma_{\text{comp,max}}$$

kann die Spannungs-Rissöffnungsbeziehung im Intervall $w \leq 0 \leq w_{\text{UHPC,max}}$ angegeben werden:

$$\sigma_{\text{comp}}(w = w_{\text{UHPC,max}}) = \sigma_{\text{comp,min d}} = \frac{F_{\text{MB}}}{A_c} = \frac{\varepsilon_{\text{MB}} \cdot E_{\text{MB}} \cdot A_{\text{MB}}}{A_c}$$

hierbei ist der Dehnungszustand der Mikrobewehrung bei maximaler Rissöffnung der UHPC-Matrix zu berücksichtigen. Daher werden nachfolgend zwei Fälle unterschieden:

$$a1) \quad 0 \leq w \leq w_{\text{UHPC,max}} \quad \text{und} \quad \varepsilon_{\text{MB}}(w_{\text{UHPC,max}}) \leq \varepsilon_{\text{MBy}}$$

$$\sigma_{\text{comp,min d}} = \frac{\left(\frac{\sigma_{\text{UHPC,max}}}{E_{\text{UHPC}}} + \frac{w_{\text{UHPC,max}}}{2 \cdot I_{\text{MW}}} \right) \cdot E_{\text{MB}} \cdot A_{\text{MB}}}{A_{\text{c}}}$$

$$\sigma_{\text{comp,min d}} = \left(\frac{\sigma_{\text{UHPC,max}}}{E_{\text{UHPC}}} + \frac{w_{\text{UHPC,max}}}{2 \cdot I_{\text{MW}}} \right) \cdot E_{\text{MB}} \cdot \eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}}$$

$$\text{mit } w_{\text{UHPC,max}} = \frac{2 \cdot G_{\text{F}}}{\sigma_{\text{UHPC,max}}}$$

$$\sigma_{\text{comp,min d}} = \left(\frac{\sigma_{\text{UHPC,max}}}{E_{\text{UHPC}}} + \frac{G_{\text{F}}}{\sigma_{\text{UHPC,max}} \cdot I_{\text{MW}}} \right) \cdot E_{\text{MB}} \cdot \eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}}$$

Unter der Annahme, dass der abfallende Ast von der maximalen Spannung des Verbundwerkstoffs bis zur "Mindestfestigkeit" des Verbundwerkstoffs einen linearen Verlauf aufweist, kann die nachfolgende Beziehung hergeleitet werden:

$$\sigma_{\text{comp}}(w) = - \frac{\sigma_{\text{comp,max}} - \sigma_{\text{comp,min d}}}{w_{\text{UHPC,max}}} \cdot w + \sigma_{\text{comp,max}}$$

$$= \frac{-\sigma_{\text{comp,max}} + \left(\frac{\sigma_{\text{UHPC,max}}}{E_{\text{UHPC}}} + \frac{w_{\text{UHPC,max}}}{2 \cdot I_{\text{MW}}} \right) \cdot E_{\text{MB}} \cdot \eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}}}{w_{\text{UHPC,max}}} \cdot w + \sigma_{\text{comp,max}}$$

$$\text{mit } w_{\text{UHPC,max}} = \frac{2 \cdot G_{\text{F}}}{\sigma_{\text{UHPC,max}}}$$

$$\sigma_{\text{comp}}(w) = \frac{-\sigma_{\text{comp,max}} + \sigma_{\text{UHPC,max}} \cdot \alpha \cdot \eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}} + \left(\frac{2 \cdot G_{\text{F}} \cdot E_{\text{MB}} \cdot \eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}}}{\sigma_{\text{UHPC,max}} \cdot 2 \cdot I_{\text{MW}}} \right)}{2 \cdot G_{\text{F}}} \cdot \sigma_{\text{UHPC,max}} \cdot w + \sigma_{\text{comp,max}}$$

$$= \frac{-\sigma_{\text{comp,max}} \cdot \sigma_{\text{UHPC,max}} + \sigma_{\text{UHPC,max}}^2 \cdot \alpha \cdot \eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}} + \left(\frac{G_{\text{F}} \cdot E_{\text{MB}} \cdot \eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}}}{I_{\text{MW}}} \right)}{2 \cdot G_{\text{F}}} \cdot w + \sigma_{\text{comp,max}}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{2} \cdot w \cdot \frac{\sigma_{\text{UHPC,max}}}{G_F} \cdot \left(-\sigma_{\text{comp,max}} + \sigma_{\text{UHPC,max}} \cdot \alpha \cdot \eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}} + \frac{G_F \cdot E_{\text{MB}} \cdot \eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}}}{\sigma_{\text{UHPC,max}} \cdot l_{\text{MW}}} \right) + \sigma_{\text{comp,max}} \\
&= \frac{1}{2} \cdot w \cdot \frac{\sigma_{\text{UHPC,max}}}{G_F} \cdot \eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}} \cdot \left(\frac{-\sigma_{\text{comp,max}}}{\eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}}} + \sigma_{\text{UHPC,max}} \cdot \alpha + \frac{G_F \cdot E_{\text{MB}}}{\sigma_{\text{UHPC,max}} \cdot l_{\text{MW}}} \right) + \sigma_{\text{comp,max}}
\end{aligned}$$

mit $\sigma_{\text{comp,max}} = \sigma_{\text{UHPC,max}} + \sigma_{\text{UHPC,max}} \cdot \eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}} \cdot (\alpha - 1)$

$$\begin{aligned}
\sigma_{\text{comp}}(w) &= \frac{1}{2} \cdot w \cdot \frac{\sigma_{\text{UHPC,max}}}{G_F} \cdot \eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}} \\
&\cdot \left(\frac{-\sigma_{\text{UHPC,max}} - \sigma_{\text{UHPC,max}} \cdot \eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}} \cdot (\alpha - 1)}{\eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}}} + \sigma_{\text{UHPC,max}} \cdot \alpha + \frac{G_F \cdot E_{\text{MB}}}{\sigma_{\text{UHPC,max}} \cdot l_{\text{MW}}} \right) \\
&+ \sigma_{\text{UHPC,max}} + \sigma_{\text{UHPC,max}} \cdot \eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}} \cdot (\alpha - 1) \\
&= \frac{1}{2} \cdot w \cdot \frac{\sigma_{\text{UHPC,max}}}{G_F} \cdot \eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}} \\
&\cdot \left(\frac{-\sigma_{\text{UHPC,max}}}{\eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}}} - \sigma_{\text{UHPC,max}} \cdot (\alpha - 1) + \sigma_{\text{UHPC,max}} \cdot \alpha + \frac{G_F \cdot E_{\text{MB}}}{\sigma_{\text{UHPC,max}} \cdot l_{\text{MW}}} \right) \\
&+ \sigma_{\text{UHPC,max}} \cdot (1 + \eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}} \cdot (\alpha - 1))
\end{aligned}$$

$ \sigma_{\text{comp}}(w) = \frac{1}{2} \cdot w \cdot \frac{\sigma_{\text{UHPC,max}}}{G_F} \cdot \eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}} \cdot \left(\sigma_{\text{UHPC,max}} + \frac{E_{\text{MB}} \cdot G_F}{\sigma_{\text{UHPC,max}} \cdot l_{\text{MW}}} - \frac{\sigma_{\text{UHPC,max}}}{\eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}}} \right) + \sigma_{\text{UHPC,max}} \cdot (1 + \eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}} \cdot (\alpha - 1)) $

$$a2) 0 \leq w \leq w_{UHPC,max} \text{ und } \epsilon_{MB}(w_{UHPC,max}) > \epsilon_{MB,y}$$

Für den idealisierten linearen Abschnitt von Fließbeginn bis zum Erreichen der Maximalspannung gilt für den Mikrobewehrungsdraht

$$\sigma_{MB}(\epsilon_{MB}) = \left(\left(\frac{\epsilon_{MB} - \epsilon_{MB,y}}{\epsilon_{MB,max} - \epsilon_{MB,y}} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{MB,max}}{\sigma_{MB,y}} - 1 \right) + 1 \right) \cdot \sigma_{MB,y}$$

Die Mindestzugfestigkeit errechnet sich mit

$$\sigma_{comp}(w = 0) \approx \sigma_{comp,max}$$

$$\epsilon_{MB}(w_{UHPC,max}) = \frac{\sigma_{UHPC,max}}{E_{UHPC}} + \frac{w_{UHPC,max}}{2 \cdot I_{MW}}$$

Zu

$$\begin{aligned} \sigma_{comp}(w = w_{UHPC,max}) &= \sigma_{comp,min d} = \frac{F_{MB}}{A_c} \\ &= \left(\left(\frac{\left(\frac{\sigma_{UHPC,max}}{E_{UHPC}} + \frac{w_{UHPC,max}}{2 \cdot I_{MW}} \right) - \epsilon_{MB,y}}{\epsilon_{MB,max} - \epsilon_{MB,y}} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{MB,max}}{\sigma_{MB,y}} - 1 \right) + 1 \right) \cdot \sigma_{MB,y} \cdot \eta_{MB} \cdot V_{MB} \end{aligned}$$

Für die Spannungs-Rissöffnungsbeziehung gilt wie unter a1) allgemein

$$\sigma_{comp}(w) = - \frac{\sigma_{comp,max} - \sigma_{comp,min d}}{w_{UHPC,max}} \cdot w + \sigma_{comp,max}$$

allerdings unter Berücksichtigung des veränderten Wertes $\sigma_{comp,min d}$ ergibt sich

$$\begin{aligned} \sigma_{comp}(w) &= \frac{-\sigma_{comp,max} + \left(\frac{\left(\frac{\sigma_{UHPC,max}}{E_{UHPC}} + \frac{w_{UHPC,max}}{2 \cdot I_{MW}} \right) - \epsilon_{MB,y}}{\epsilon_{MB,max} - \epsilon_{MB,y}} \cdot \left(\frac{\sigma_{MB,max}}{\sigma_{MB,y}} - 1 \right) + 1 \right) \cdot \sigma_{MB,y} \cdot \eta_{MB} \cdot V_{MB}}{w_{UHPC,max}} \\ &\quad \cdot w + \sigma_{comp,max} \end{aligned}$$

$$\text{mit } w_{\text{UHPC,max}} = \frac{2 \cdot G_F}{\sigma_{\text{UHPC,max}}}$$

$$\sigma_{\text{comp}}(w) = \frac{-\sigma_{\text{comp,max}}}{2 \cdot G_F} \cdot w \cdot \sigma_{\text{UHPC,max}} + \frac{\left(\left(\frac{\sigma_{\text{UHPC,max}}}{E_{\text{UHPC}}} + \frac{G_F}{I_{\text{MW}} \cdot \sigma_{\text{UHPC,max}}} \right) - \epsilon_{\text{MB,y}} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{\text{MB,max}}}{\sigma_{\text{MB,y}}} - 1 \right) + 1 \cdot \sigma_{\text{MB,y}} \cdot \eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}}}{2 \cdot G_F} \cdot w \cdot \sigma_{\text{UHPC,max}} + \sigma_{\text{comp,max}}$$

$$\text{mit } \sigma_{\text{comp,max}} = \sigma_{\text{UHPC,max}} + \sigma_{\text{UHPC,max}} \cdot \eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}} \cdot (\alpha - 1)$$

$$\sigma_{\text{comp}}(w) = \frac{-\sigma_{\text{UHPC,max}} - \sigma_{\text{UHPC,max}} \cdot \eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}} \cdot (\alpha - 1)}{2 \cdot G_F} \cdot w \cdot \sigma_{\text{UHPC,max}} + \frac{\left(\frac{\sigma_{\text{UHPC,max}}}{E_{\text{UHPC}}} + \frac{G_F}{I_{\text{MW}} \cdot \sigma_{\text{UHPC,max}}} - \epsilon_{\text{MB,y}} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{\text{MB,max}}}{\sigma_{\text{MB,y}}} - 1 \right) + 1 \cdot \sigma_{\text{MB,y}} \cdot \eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}}}{2 \cdot G_F} \cdot w \cdot \sigma_{\text{UHPC,max}} + \sigma_{\text{UHPC,max}} + \sigma_{\text{UHPC,max}} \cdot \eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}} \cdot (\alpha - 1)$$

$$\sigma_{\text{comp}}(w) = \sigma_{\text{UHPC,max}} \cdot \eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}} \cdot \left(\frac{w}{2 \cdot G_F} \cdot \left(\sigma_{\text{UHPC,max}} \cdot \left(1 - \alpha - \frac{1}{\eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}}} \right) + \sigma_{\text{MB,y}} \cdot \left(1 + \left(\frac{\sigma_{\text{MB,max}}}{\sigma_{\text{MB,y}}} - 1 \right) \cdot \frac{\left(\frac{\sigma_{\text{UHPC,max}}}{E_{\text{UHPC}}} + \frac{G_F}{I_{\text{MW}} \cdot \sigma_{\text{UHPC,max}}} - \epsilon_{\text{MB,y}} \right)}{\epsilon_{\text{MB,max}} - \epsilon_{\text{MB,y}}} \right) \right) + (\alpha - 1) \cdot \frac{1}{\eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}}} \right)$$

$$b) \ w_{\text{UHPC,max}} \leq w \leq w_u$$

Die Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung wird in diesem Bereich allein durch das Materialgesetz der Mikrobewehrung bestimmt. Je nach Dehnungszustand der Mikrobewehrung bei der maximalen Rissweite der UHPC-Matrix besitzen die folgenden Funktionen Gültigkeit:

$$b1) \ \varepsilon_{\text{MB}}(w_{\text{UHPC,max}}) \leq \varepsilon_{\text{MB,y}}$$

$$\sigma_{\text{comp}}(w) = \left(\frac{w}{2 \cdot l_{\text{MW}}} + \frac{\sigma_{\text{UHPC,max}}}{E_{\text{UHPC}}} \right) \cdot E_{\text{MB}} \cdot \eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}}$$

$$b2) \ \varepsilon_{\text{MB,y}} < \varepsilon_{\text{MB}}(w_{\text{UHPC,max}}) \leq \varepsilon_{\text{MB,max}}$$

$$\sigma_{\text{comp}}(w) = \left(\left(\frac{\frac{w}{2 \cdot l_{\text{MW}}} + \frac{\sigma_{\text{UHPC,max}}}{E_{\text{UHPC}}} - \varepsilon_{\text{MB,y}}}{\varepsilon_{\text{MB,max}} - \varepsilon_{\text{MB,y}}} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{\text{MB,max}}}{\sigma_{\text{MB,y}}} - 1 \right) + 1 \right) \cdot \sigma_{\text{MB,y}} \cdot \eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}}$$

$$b3) \ \varepsilon_{\text{MB,max}} < \varepsilon_{\text{MB}}(w_{\text{UHPC,max}}) \leq \varepsilon_{\text{MB,u}}$$

$$\sigma_{\text{comp}}(w) = \sigma_{\text{MB,max}} \cdot \eta_{\text{MB}} \cdot V_{\text{MB}}$$

B 2 Bestimmung der Biegetragfähigkeit

Da es sich im Folgenden um eine Nachrechnung von experimentellen Untersuchungen handelt, kommen ausschließlich charakteristische Werte bzw. Mittelwerte aus Versuchen zum Einzeltragverhalten zum Einsatz.

Den beiden nachfolgenden Berechnungen liegen folgende Annahmen zugrunde:

Rechteckquerschnitt:

Breite $b = 150 \text{ mm}$

Höhe $h = 150 \text{ mm}$

Mikrobewehrung (trilinearer Verlauf):

$E_{MB} = 210.000 \text{ N/mm}^2$

$\sigma_{MB,y} = 265 \text{ N/mm}^2$

$\varepsilon_{MB,y} = 1,26 \text{ ‰}$

$\sigma_{MB,max} = 381 \text{ N/mm}^2$

$\varepsilon_{MB}(\sigma_{MB,max}) = 88 \text{ ‰}$

$\varepsilon_{MB,u} = 200 \text{ ‰}$

Ultrahochleistungsbeton (vereinfacht linearer Verlauf Druck/Zug)

$E_{UHPC} = 49.000 \text{ N/mm}^2$

$\sigma_{UHPC,max} = 8,6 \text{ N/mm}^2$

$\sigma_{UHPC,min} = -151 \text{ N/mm}^2$

$\varepsilon_{UHPC,u} = 3,3 \text{ ‰}$

a) Mikrobewehrungstyp MB1, 2,6 Vol.-%, Bewehrung horizontal

Durchmesser = 1,0 mm

Anzahl Mikrobewehrungsmatten = 27

Anzahl Längsdrähte je Mikrobewehrungsmatte = 14

Abstand der Mikrobewehrungsmatten untereinander = Randabstand = 5,36 mm

1. Abschätzung Druckzonenhöhe $x = 7,553 \text{ mm}$

2. Dehnungsberechnung

$$\epsilon_{MB1} = \frac{5,36 - 7,55}{7,55} \cdot 3,30 = -0,96 \text{ ‰}$$

$$\epsilon_{MB2} = \frac{2 \cdot 5,36 - 7,55}{7,55} \cdot 3,30 = 1,39 \text{ ‰}$$

⋮

$$\epsilon_{MB27} = \frac{27 \cdot 5,36 - 7,55}{7,55} \cdot 3,30 = 59,96 \text{ ‰}$$

3. Berechnung der zugehörigen Kräfte in der Mikrobewehrung

$$F_{MB1} = \left(-0,96 \text{ ‰} \cdot 210.000 + 151 \cdot \frac{7,55 - 5,36}{7,55} \right) \cdot \frac{\pi \cdot \varnothing^2}{4} \cdot 14 = -1.735 \text{ N}$$

$$F_{MB2} = 1,39 \text{ ‰} \cdot 210.000 \cdot \frac{\pi \cdot \varnothing^2}{4} \cdot 14 = 3.210 \text{ N}$$

⋮

$$F_{MB27} = 381 \cdot \frac{\pi \cdot \varnothing^2}{4} \cdot 14 = 4.189 \text{ N}$$

4. Berechnung der zugehörigen Kräfte im UHPC

$$F_{UHPC,C} = \frac{1}{2} \cdot 7,55 \cdot (-151) \cdot 150 = -85.504 \text{ N}$$

$$F_{UHPC,T} = \frac{1}{2} \cdot \frac{8,6}{151} \cdot 7,55 \cdot 8,6 \cdot 150 = 277 \text{ N}$$

5. Überprüfung des Kräftegleichgewichtes

$$\Sigma F_{MB,T} + F_{UHPC,T} = 3.210 + \dots + 4.189 + 277 = 87.241 \text{ N}$$

$$\Sigma F_{MB,C} + F_{UHPC,C} = (-1.735) + (-85.504) = -87.239 \text{ N}$$

$$87.241 \text{ N} \approx 87.239 \text{ N} \rightarrow \Delta F = 2 \text{ N} \approx 0$$

Für die Druckzonenhöhe $x = 7,553 \text{ mm}$ herrscht Gleichgewicht.

6. Berechnung des zugehörigen Biegemomentes

$$\begin{aligned} M &= -1.735 \cdot \left(5,36 - \frac{1}{3} \cdot 7,55 \right) + 3.210 \cdot \left(2 \cdot 5,36 - \frac{1}{3} \cdot 7,55 \right) + \dots \\ &+ 4.189 \cdot \left(27 \cdot 5,36 - \frac{1}{3} \cdot 7,55 \right) + 277 \cdot \frac{2}{3} \cdot 7,55 \cdot \left(1 + \frac{8,6}{151} \right) \\ &= 6,80 \cdot 10^6 \text{ Nmm} \\ &= 6,80 \cdot \text{kNm} \end{aligned}$$

b) Mikrobewehrungstyp MB1, 2,6 Vol.-%, Bewehrung vertikal

Durchmesser = 1,0 mm

Anzahl Mikrobewehrungsmatten = 27

Anzahl Längsdrähte je Mikrobewehrungsmatte = 14

Abstand der Mikrobewehrungsmatten untereinander = 11 mm

Randabstand = 3,50 mm

1. Abschätzung Druckzonenhöhe $x = 7,042$ mm

2. Dehnungsberechnung

$$\epsilon_{MB1} = \frac{3,50 - 7,04}{7,04} \cdot 3,30 = -1,66 \text{ ‰}$$

$$\epsilon_{MB2} = \frac{(3,5 + 11) - 7,04}{7,04} \cdot 3,30 = 3,50 \text{ ‰}$$

⋮

$$\epsilon_{MB14} = \frac{(3,5 + 13 \cdot 11) - 7,04}{7,04} \cdot 3,30 = 65,37 \text{ ‰}$$

3. Berechnung der zugehörigen Kräfte in der Mikrobewehrung

$$F_{MB1} = \left(-1,66 \text{ ‰} \cdot 210.000 + 151 \cdot \frac{7,04 - 3,50}{7,04} \right) \cdot \frac{\pi \cdot \varnothing^2}{4} \cdot 27 = -9.002 \text{ N}$$

$$F_{MB2} = \left(\frac{381 - 265}{88 \text{ ‰} - 1,26 \text{ ‰}} \cdot 3,50 \text{ ‰} + 265 - \frac{381 - 265}{88 \text{ ‰} - 1,26 \text{ ‰}} \cdot 1,26 \text{ ‰} \right) \cdot \frac{\pi \cdot \varnothing^2}{4} \cdot 27 = 5.683 \text{ N}$$

⋮

$$F_{MB14} = 381 \cdot \frac{\pi \cdot \varnothing^2}{4} \cdot 27 = 8.079 \text{ N}$$

4. Berechnung der zugehörigen Kräfte im UHPC

$$F_{\text{UHPC,C}} = \frac{1}{2} \cdot 7,04 \cdot (-151) \cdot 150 = -79.728 \text{ N}$$

$$F_{\text{UHPC,T}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{8,6}{151} \cdot 7,04 \cdot 8,6 \cdot 150 = 259 \text{ N}$$

5. Überprüfung des Kräftegleichgewichtes

$$\Sigma F_{\text{MB,T}} + F_{\text{UHPC,T}} = 5.683 + \dots + 8.079 + 259 = 88.732 \text{ N}$$

$$\Sigma F_{\text{MB,C}} + F_{\text{UHPC,C}} = (-9.002) + (-79.728) = -88.730 \text{ N}$$

$$88.732 \text{ N} \approx 88.730 \text{ N} \rightarrow \Delta F = 2 \text{ N} \approx 0$$

Für die Druckzonenhöhe $x = 7,61 \text{ mm}$ herrscht Gleichgewicht.

6. Berechnung des zugehörigen Biegemomentes

$$\begin{aligned} M &= -9.002 \cdot \left(3,50 - \frac{1}{3} \cdot 7,04 \right) + 5.683 \cdot \left((3,50 + 11,00) - \frac{1}{3} \cdot 7,04 \right) + \dots \\ &+ 8079 \cdot \left((3,50 + 13 \cdot 11,00) - \frac{1}{3} \cdot 7,04 \right) + 259 \cdot \frac{2}{3} \cdot 7,04 \cdot \left(1 + \frac{8,6}{151} \right) \\ &= 6,95 \cdot 10^6 \text{ Nmm} \\ &= 6,95 \cdot \text{kNm} \end{aligned}$$

B 3 Vergleich Maximalkräfte aus Versuch und Handrechnung

Tabelle B 3.1: Mittelwerte der Maximallasten aus Versuch und Berechnung

Orientierung	Typ	N _L	N	V _{MB} [Vol.-%]	F _{exp}	F _{cal}	F _{exp} /F _{cal}	
							Einzelwert	Mittelwert
horizontal	MB1	14	27	2,6	77,0	68,0	0,88	0,88
	MB3	9	18	2,5	74,0	65,7	0,89	
	MB4	7	22	2,4	72,1	63,3	0,88	
	MB5	7	14	2,7	80,0	69,5	0,87	
	MB1	14	53	5,1	156,5	120,8	0,77	0,77
	MB3	9	44	6,1	(204,0) 178,3	141,2	0,79	
	MB4	7	43	4,7	149,0	111,6	0,75	
	MB5	7	28	5,4	165,2	126,0	0,76	
vertikal	MB1	27	14	2,6	84,4	69,5	0,82	0,82
	MB3	22	9	3,0	96,5	80,0	0,83	
	MB4	22	7	2,4	77,4	63,1	0,82	
	MB5	14	7	2,7	88,2	70,4	0,80	
	MB1	53	14	5,1	154,9	122,4	0,79	0,74
	MB3	44	9	6,1	206,3	144,4	0,70	
	MB4	43	7	4,7	156,0	111,2	0,71	
	MB5	28	7	5,4	170,9	127,2	0,74	

**B 4 Vergleich der Kraft-Verformungs-Linien aus FE-
Berechnung und Versuch**

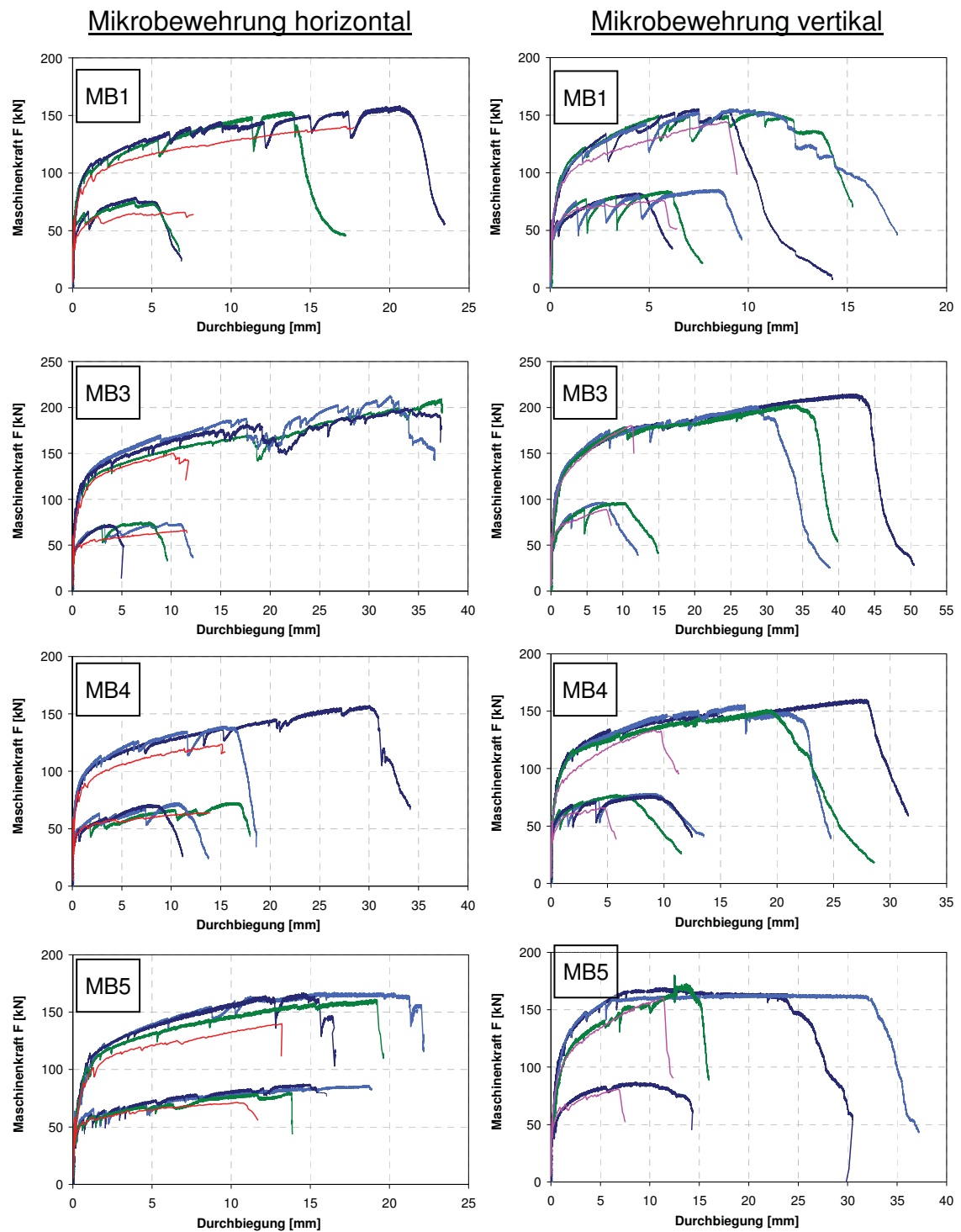


Abbildung B 4.1: Kraft-Verformungs-Linien aus FE-Berechnung und Versuch

Anhang C

Bemessungsdiagramme

C 1 Kennwerte der unterschiedlichen Stahltypen

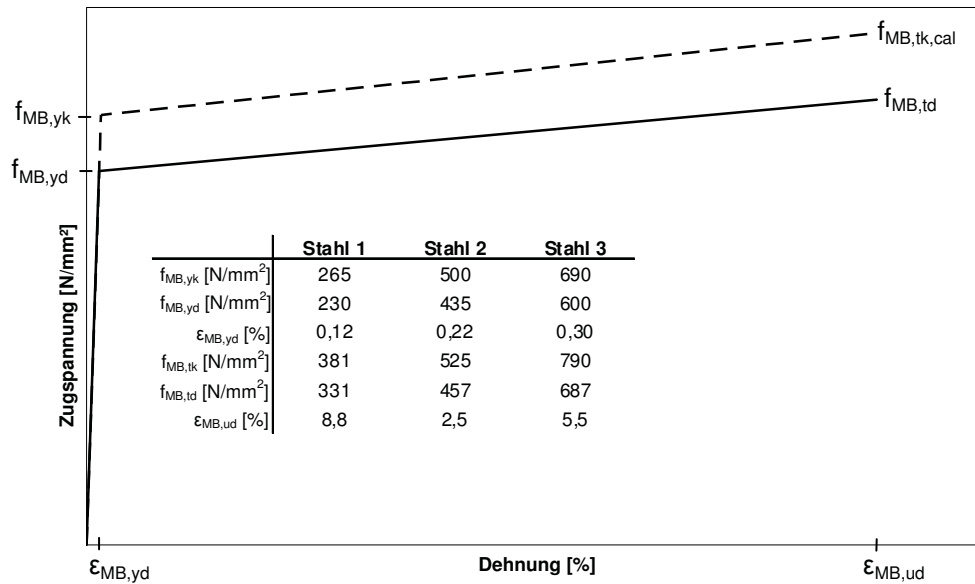


Abbildung C 1.1: Arbeitslinie allgemein mit zugehörigen Kennwerten als Grundlage für Bemessungstafel

C 2 Bemessungstafel zur Bestimmung des erforderlichen Stahlgehaltes für weitere Stähle

Tabelle C 2.1: Bemessungstafel für weitere Stähle

m [N/mm²]	Stahl 2				Stahl 3			
	V _{MB} [Vol.-%]	ε _{MB,Rand} [‰]	x/h [-]		V _{MB} [Vol.-%]	ε _{MB,Rand} [‰]	x/h [-]	
0,3								
0,4	0,36	120,2	0,018					
0,5	0,45	97,8	0,022					
0,6	0,54	82,6	0,026		0,37	81,4	0,026	
0,7	0,63	71,7	0,030		0,43	70,6	0,030	
0,8	0,72	63,3	0,034		0,50	62,4	0,034	
0,9	0,81	56,8	0,038		0,57	56,0	0,038	
1,0	0,91	51,5	0,042		0,64	50,8	0,042	
1,1	1,00	47,2	0,045		0,71	46,5	0,045	
1,2	1,10	43,5	0,049		0,78	42,9	0,049	
1,3	1,19	40,4	0,053		0,85	39,8	0,053	
1,4	1,29	37,7	0,057		0,92	37,2	0,057	
1,5	1,39	35,4	0,061		0,99	34,9	0,060	
1,6	1,49	33,4	0,064		1,06	32,9	0,064	
1,7	1,59	31,5	0,068		1,14	31,1	0,068	
1,8	1,69	29,9	0,071		1,21	29,5	0,071	
1,9	1,79	28,5	0,075		1,28	28,0	0,075	
2,0	1,90	27,1	0,079		1,36	26,7	0,078	
2,1	2,00	25,9	0,082		1,44	25,6	0,082	
2,2	2,10	24,8	0,085		1,51	24,5	0,085	
2,3	2,21	23,8	0,089		1,59	23,5	0,089	
2,4	2,32	22,9	0,092		1,67	22,6	0,092	
2,5	2,42	22,1	0,096		1,75	21,7	0,096	
2,6	2,53	21,3	0,099		1,83	21,0	0,099	
2,7	2,64	20,6	0,102		1,91	20,3	0,103	
2,8	2,75	19,9	0,106		1,99	19,6	0,106	
2,9	2,86	19,2	0,109		2,07	19,0	0,109	
3,0	2,97	18,6	0,112		2,15	18,4	0,112	
3,1	3,08	18,1	0,115		2,24	17,8	0,116	
3,2	3,19	17,6	0,118		2,32	17,3	0,119	
3,3	3,31	17,1	0,122		2,40	16,8	0,122	
3,4	3,42	16,6	0,125		2,49	16,4	0,125	
3,5	3,54	16,2	0,128		2,57	15,9	0,128	
3,6	3,65	15,8	0,131		2,66	15,5	0,131	
3,7	3,77	15,4	0,134		2,75	15,1	0,135	
3,8	3,89	15,0	0,137		2,84	14,8	0,138	
3,9	4,00	14,6	0,140		2,92	14,4	0,141	
4,0	4,12	14,3	0,143		3,01	14,1	0,144	
4,1	4,24	14,0	0,145		3,10	13,8	0,147	
4,2	4,36	13,7	0,148		3,19	13,5	0,149	
4,3	4,48	13,4	0,151		3,29	13,2	0,152	
4,4	4,60	13,1	0,154		3,38	12,9	0,155	
4,5	4,73	12,8	0,157		3,47	12,6	0,158	
4,6	4,85	12,6	0,159		3,56	12,4	0,161	

m [N/mm²]	Stahl 2				Stahl 3			
	V _{MB} [Vol.-%]	ε _{MB,Rand} [‰]	x/h [-]		V _{MB} [Vol.-%]	ε _{MB,Rand} [‰]	x/h [-]	
4,7	4,97	12,3	0,162		3,66	12,1	0,164	
4,8	5,09	12,1	0,165		3,75	11,9	0,167	
4,9	5,22	11,8	0,168		3,85	11,7	0,169	
5,0	5,34	11,6	0,170		3,95	11,5	0,172	
5,1	5,47	11,4	0,173		4,04	11,2	0,175	
5,2	5,60	11,2	0,175		4,14	11,0	0,177	
5,3	5,72	11,0	0,178		4,24	10,9	0,180	
5,4	5,85	10,8	0,181		4,34	10,7	0,183	
5,5	5,98	10,6	0,183		4,44	10,5	0,185	
5,6	6,11	10,5	0,186		4,54	10,3	0,188	
5,7	6,24	10,3	0,188		4,64	10,1	0,190	
5,8	6,37	10,1	0,190		4,74	10,0	0,193	
5,9	6,50	10,0	0,193		4,84	9,8	0,195	
6,0	6,63	9,8	0,195		4,95	9,7	0,198	
6,1	6,76	9,7	0,198		5,05	9,5	0,200	
6,2	6,90	9,5	0,200		5,16	9,4	0,203	
6,3	7,03	9,4	0,202		5,26	9,2	0,205	
6,4	7,16	9,3	0,205		5,37	9,1	0,207	
6,5	7,30	9,1	0,207		5,47	9,0	0,210	
6,6	7,43	9,0	0,209		5,58	8,9	0,212	
6,7	7,57	8,9	0,211		5,69	8,7	0,214	
6,8	7,70	8,7	0,214		5,80	8,6	0,217	
6,9	7,84	8,6	0,216		5,91	8,5	0,219	
7,0	7,97	8,5	0,218		6,02	8,4	0,221	
7,1	8,11	8,4	0,220		6,13	8,3	0,223	
7,2					6,24	8,2	0,226	
7,3					6,35	8,1	0,228	
7,4					6,46	8,0	0,230	
7,5					6,58	7,9	0,232	
7,6					6,69	7,8	0,234	
7,7					6,81	7,7	0,236	
7,8					6,92	7,6	0,238	
7,9					7,04	7,5	0,240	
8,0					7,16	7,4	0,242	
8,1					7,27	7,3	0,244	
8,2					7,39	7,2	0,246	
8,3					7,51	7,2	0,248	
8,4					7,63	7,1	0,250	
8,5					7,75	7,0	0,252	
8,6					7,87	6,9	0,254	
8,7					8,00	6,9	0,255	
8,8					8,12	6,8	0,257	
8,9					8,24	6,7	0,259	
9,0					8,37	6,6	0,261	

C 3 Bestimmung der erforderlichen Anzahl an Mikrobewehrungsmatten in Abhängigkeit des Drahtdurchmessers und der Maschenweite

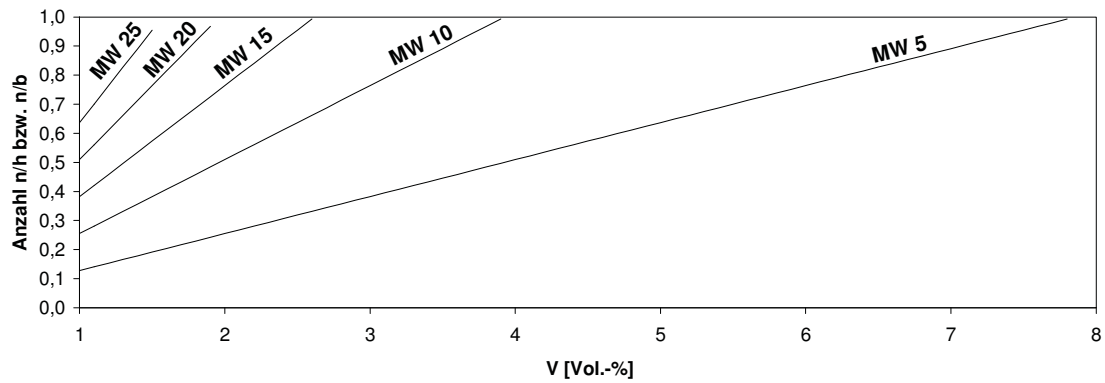


Abbildung C 3.1: Bestimmung der erforderlichen Anzahl an Mikrobewehrungslagen für Drahtdurchmesser 0,5 mm

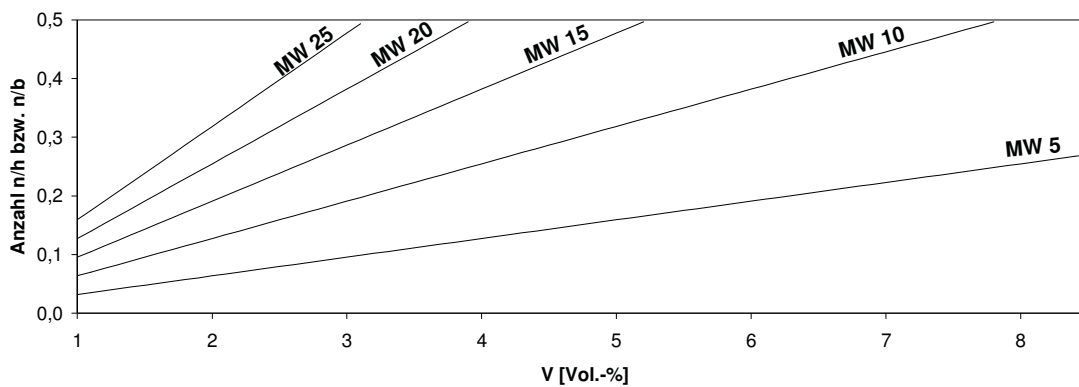


Abbildung C 3.2: Bestimmung der erforderlichen Anzahl an Mikrobewehrungslagen für Drahtdurchmesser 1,0 mm

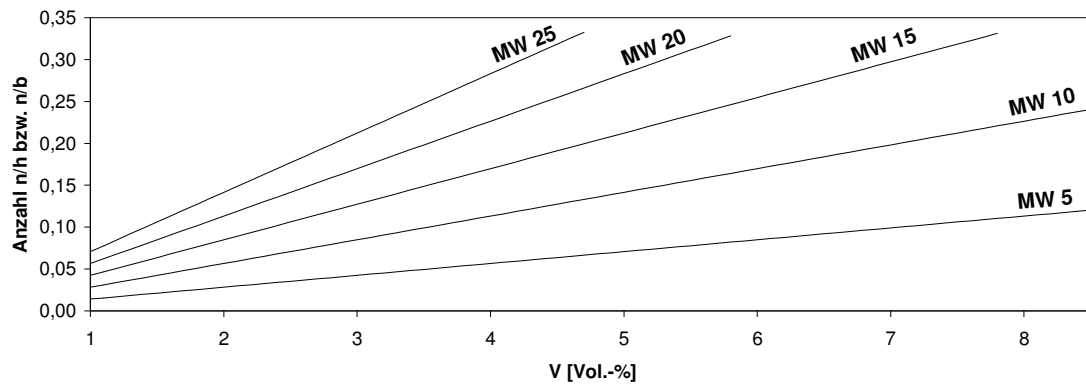


Abbildung C 3.3: Bestimmung der erforderlichen Anzahl an Mikrobewehrungslagen für Drahtdurchmesser 1,5 mm

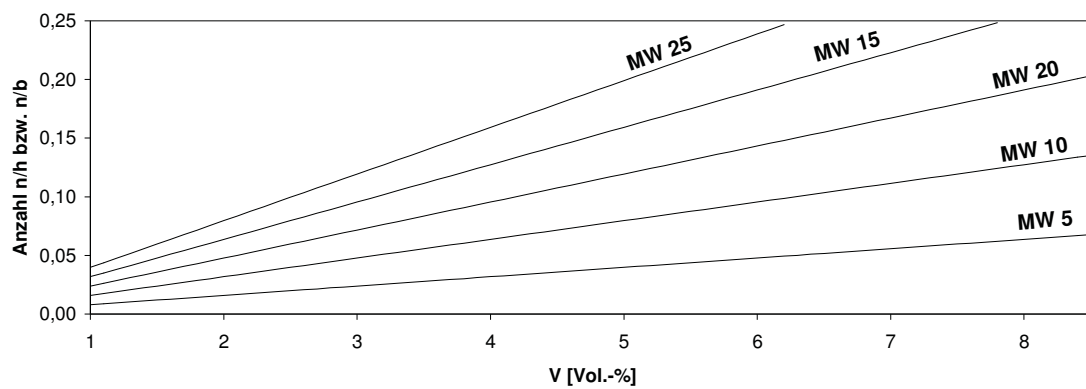


Abbildung C 3.4: Bestimmung der erforderlichen Anzahl an Mikrobewehrungslagen für Drahtdurchmesser 2,0 mm

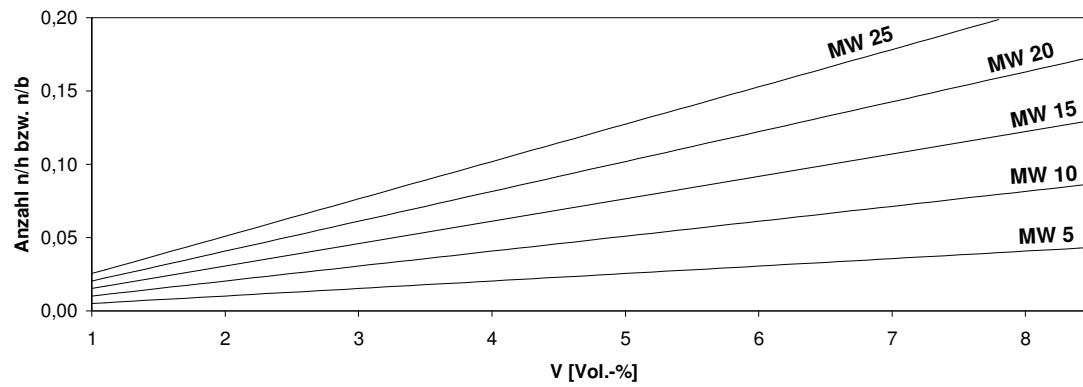


Abbildung C 3.5: Bestimmung der erforderlichen Anzahl an Mikrobewehrungslagen für Drahtdurchmesser 2,5 mm